



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
WIEN  
Vienna University of Technology



## DIPLOMARBEIT

# Voraussetzungen für die GNSS gestützte Steuerung von Bettungsreinigungsmaschinen

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

im Rahmen des Studiums

Geodäsie & Geoinformation

eingereicht von

Klaus Gutleiderer

Matrikelnummer 01127094

ausgeführt am Department für Geodäsie & Geoinformation  
der Fakultät für Mathematik & Geoinformation der Technischen Universität Wien

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Robert Weber

Mitwirkung: Projektass. Dipl.-Ing. Bakk.techn. Jadre Maras

Mitwirkung: Dr.techn. Dipl.-Ing. Bakk.techn. Fabian Hinterberger

Wien, 16. Dezember 2019

---

(Unterschrift Verfasser)

---

(Unterschrift Betreuer)



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar  
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

### *Erklärung zur Verfassung der Arbeit*

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst habe, dass ich die verwendeten Quellen und Hilfsmittel vollständig angegeben habe und dass ich die Stellen der Arbeit – einschließlich Tabellen und Abbildungen –, die anderen Werken oder dem Internet im Wortlaut oder dem Sinn nach entnommen sind, unter Angabe der Quelle als Entlehnung kenntlich gemacht habe.

Wien, 16. Dezember 2019

---

(Unterschrift Verfasser)

### *Geschlechtsspezifische Formulierung*

Im Sinne der besseren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Arbeit die Sprachform des generischen Maskulinums angewendet. Die ausschließliche Verwendung der männlichen Form impliziert keine Benachteiligung des anderen Geschlechts, sondern ist im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen.

## *Danksagung*

Beginnen möchte ich mit einem herzlichen „Danke“ bei Herrn Prof. Dr. Robert Weber für seine stets qualifizierten und wissenschaftlichen Auskünfte. Weiters danke ich Herrn Dipl.-Ing. Jadre Maras für die umgängliche, zuverlässige sowie hilfsbereite Mitbetreuung.

Ebenfalls danken will ich meinem unmittelbaren Ansprechpartner bei der Plasser & Theurer Ges.m.b.H, Herrn Dr. Fabian Hinterberger, für die fachbezogene und unkomplizierte Unterstützung.

Ein weiteres Dankeschön gilt der Plasser & Theurer Ges.m.b.H, welche mir die Möglichkeit gab, mich durch meine Diplomarbeit an der nachstehenden interessanten sowie aktuellen Thematik zu beteiligen.

Mein besonderer Dank geht an meine bezaubernden Kinder Leia und Liam für den liebevollen kompensierenden Ausgleich, sowie an meine liebenswerte Freundin und Lebensgefährtin Patrizia für ihr unterstützendes Wesen als auch ihre optimistisch-motivierenden Worte.

Ein abschließendes Danke richtet sich an Christina und Stephanie für die kritische Korrekturlesung sowie an meinen Kollegen Maximillian Sommer, welcher mir als Messhelfer am Dach der TU Wien assistiert hat.

## Kurzfassung

Durch Anwendung von GNSS-basierten Echtzeit-Methoden können gegenwärtig Positionierungsgenauigkeiten im Zentimeterbereich erzielt werden. Es wird evaluiert, inwieweit diese Methoden für die kinematische Steuerung der Aushubkette moderner Schotterbettreinigungsmaschinen genutzt werden können. In Anbetracht globaler Einsätze werden Aspekte der Korrekturdaten-Übertragung, der erreichbaren Positionsgenauigkeit sowie Voraussetzungen und Einschränkungen verschiedener GNSS-basierter Methoden analysiert und bewertet.

Angesichts der Korrekturdaten-Übertragung werden die maximalen Reichweiten der Funkübermittlung in Abhängigkeit sende- und umgebungsbezogener Parameter bestimmt. Ferner wird gezeigt, dass eine allgemein gültige Aussage hinsichtlich einer flächenbezogenen Mobilfunknetzabdeckung nicht möglich ist.

In Anbetracht verschiedener Kriterien validieren die theoretischen Analysen und praktischen Ergebnisse zweier unabhängiger Messsysteme (EM100VT und ZusiVT) das RTK Referenznetz-Konzept als geeignetste GNSS-Echtzeit-Methode zur kinematischen Positionsbestimmung. Werden günstige Bedingungen vorausgesetzt, sind mithilfe der Netz-RTK Methode bei langsamer Bewegung ( $\leq 1500$  m/h) Lageabweichungen (Across Track) von  $\leq 1.2$  cm (95 %-Quantil) und Höhenabweichungen von  $\leq 4.3$  cm (95 %-Quantil) erreichbar.

Systembedingt wird zur Steuerung der Aushubkette eine GNSS-Position unmittelbar am Gleiskörper gefordert. Die Realisierung erfolgt durch eine 7-Parameter Transformation zwischen dem GNSS- und dem Objektsystem anhand von vier Passpunkten (am EM100VT befestigte GNSS-Antennen). Ist die relative Geometrie der Passpunkte hinreichend präzise (Streckendifferenz  $\leq 3$  cm), kann in der in dieser Arbeit betrachteten Anwendung, eine Lagegenauigkeit der Koordinaten nach der Transformation von 6.6 mm (95 %-Quantil) bzw. eine Höhengenaugigkeit von 0.1 mm (95 %-Quantil) erzielt werden.

## Abstract

By using GNSS-based real-time methods, positioning accuracies in the centimetre range can currently be achieved. It will be evaluated to what extent these methods can be used for the kinematic control of the excavation chain of modern ballast bed cleaning machines. With regard to global operations, aspects of correction-data transmission, achievable position accuracy as well as requirements and limitations of various GNSS-based methods will be analyzed and assessed.

In view of the transmission of correction-data, the maximum ranges of radio transmission are determined as a function of transmission- and environment-related parameters. Furthermore, it is shown that a generally valid statement regarding area-related mobile coverage is not possible.

Considering different criteria, the theoretical analyses and practical results of two independent measurement systems (EM100VT and ZusiVT) validate the RTK-reference-network concept as the most suitable GNSS real-time method for kinematic position determination. If favourable conditions are assumed, positional deviations (across track) of  $< 1.2$  cm (95 %-quantile) and height deviations of  $< 4.3$  cm (95 %-quantile) can be achieved by means of the RTK-reference-network method with slow movement ( $< 1500$  m/h).

Due to the measuring system used, a GNSS position directly on the track is required to control the excavation chain. This can be realized by a 7-parameter between the GNSS- and the object-system using four control points (GNSS antennas attached to the EM100VT).

If the relative geometry of the control points is sufficiently precise (distance difference  $\leq 3$  cm), a positional accuracy of the coordinates after the transformation of 6.6 mm (95 %-quantile) such as a height accuracy of 0.1 mm (95 %-quantile) can be achieved in the application considered in this work.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Die ersten Lokomotiven . . . . .	1
1.2	Die Eisenbahn im 21. Jahrhundert . . . . .	4
1.3	Motivation & Gliederung der Arbeit . . . . .	6
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>8</b>
2.1	Gleisstandhaltung . . . . .	8
2.1.1	Schotterbetteinigung . . . . .	8
2.1.2	Reinigungsmaschine . . . . .	12
2.1.3	Steuerung der Aushubkette . . . . .	16
2.2	Globale Navigations-Satellitensysteme . . . . .	17
2.2.1	Prinzip . . . . .	18
2.2.2	Koordinatensysteme . . . . .	21
2.2.3	Satellitenumlaufbahnen . . . . .	24
2.2.4	GNSS – Systemkomponenten . . . . .	27
2.2.5	Zeitsysteme . . . . .	29
2.2.6	Signal . . . . .	31
2.2.7	Fehler . . . . .	33
2.2.8	Fehlerbudget & Positionsfehler . . . . .	38
2.2.9	GPS & Co. . . . .	40
<b>3</b>	<b>Präzise GNSS Methoden</b>	<b>41</b>
3.1	RTK – Real Time Kinematik . . . . .	41
3.2	RTK – Referenznetzkonzepte . . . . .	45
3.2.1	APOS . . . . .	45
3.2.2	EPOSA . . . . .	48
3.2.3	RBMC-IP . . . . .	48
3.3	PPP – Precise Point Positioning . . . . .	49
3.4	Kommerzielle PPP–Services . . . . .	51
3.4.1	Trimble . . . . .	51

3.4.2	Fugro . . . . .	53
3.4.3	OmniSTAR . . . . .	53
3.4.4	Weitere Anbieter . . . . .	54
<b>4</b>	<b>Einschränkungen und Voraussetzungen</b>	<b>56</b>
4.1	Positionierung der lokalen Referenzstation . . . . .	56
4.2	Datenübertragung . . . . .	57
4.2.1	Formate . . . . .	57
4.2.2	Kommunikation mittels Funk . . . . .	59
4.2.3	Kommunikation mittels Mobilfunknetz . . . . .	63
4.3	Satellitengeometrie . . . . .	66
4.4	Abschattung . . . . .	70
4.5	Arbeitsgeschwindigkeit & Messfrequenz . . . . .	73
<b>5</b>	<b>Praxis</b>	<b>76</b>
5.1	System EM100VT . . . . .	77
5.1.1	Komponenten . . . . .	77
5.1.2	Trajektorie & Datenaufzeichnung . . . . .	79
5.1.3	Methodik der Auswertung . . . . .	83
5.2	System ZusiVT . . . . .	89
5.2.1	Komponenten . . . . .	90
5.2.2	Trajektorie . . . . .	90
5.2.3	Konzept & Ausführung . . . . .	92
5.2.4	Auffälligkeiten . . . . .	92
5.2.5	Methodik der Auswertung . . . . .	93
5.3	Ergebnisse . . . . .	94
5.3.1	Ergebnisse EM100VT: GNSS-Genauigkeit . . . . .	94
5.3.2	Ergebnisse EM100VT: Transformation . . . . .	98
5.3.3	Ergebnisse ZusiVT: Statisch . . . . .	103
5.3.4	Ergebnisse ZusiVT: Kinematisch . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>108</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>112</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>113</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>115</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Die ersten Lokomotiven

Wird der Begriff *Bahn* umfassend als *spurgebundenes Transportmittel* definiert, führt dessen Geschichte mindestens 2000 Jahre in die Vergangenheit zurück. Als Gleiskörper fungierten Rillen aus Kalkstein, worauf Radfahrzeuge durch physisch verrichtete Arbeit angetrieben wurden. An der Wende des Spätmittelalters zur frühen Neuzeit wurde diese Art der Beförderung durch die Innovation eines Schienensystems abgelöst. Im Laufe des 18. Jahrhunderts wurde die etablierte Schientechnik stets weiterentwickelt. Eisenschienen sowie Holz/Eisen-Kombinationen ersetzen die anfänglichen Holzschienen. Der Antrieb erfolgte vorzugsweise durch Pferde (siehe Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Pferdebahn Budweis–Linz–Gmunden [Tzanakakis, 2013]

Den Durchbruch als automatisiertes, maschinell angetriebenes Schienenfahrzeug feierte die Bahn mit dem Beginn der industriellen Revolution in England. Anhand der Erfindung der Dampfmaschine im Jahre 1712 durch den Engländer *Thomas Newcomen*, sowie der fundamentalen Weiterentwicklung des Schotten *James Watt*, entwickelte der britische *Richard Trevithick* im Jahre 1802 die erste voll funktionsfähige Dampflokomotive (siehe Abbildung 1.2). In Kombination mit der inzwischen ausschließlichen Verwendung gusseiserner Schienen gilt dies als Ursprung moderner Schienenverkehrssysteme. Der Begriff *Eisenbahn* war geboren.



Abbildung 1.2: Trevithicks Dampflokomotive [National Museum Wales, 2019]

Das Modell von Trevithick kam aufgrund des hohen Gewichts, welches die damaligen, für Pferdewagen konzipierten Schienen, überlastete, nie aus dem experimentellen Stadium hinaus. *Matthew Murray* gelang es im Jahre 1812 schließlich, eine kleinere, leichtere Maschine zu konstruieren, welche die erste kommerziell erfolgreiche Dampflokomotive namens *Salamanca* werden sollte.

Von der von Trevithicks, Murrays und weiteren früheren Eisenbahningenieuren geleisteten Pionierarbeit inspiriert, war es der Engländer *George Stephenson*, welcher schließlich die *Locomotion No.1* baute. Diese Maschine eröffnete am 27. September 1825 in Nordostengland die erste öffentliche Dampfisenbahnstrecke der Welt (siehe Abbildung 1.3), bekannt unter dem Namen „Stockton & Darlington Railway“. Die rund 40 Kilometer lange Strecke bestand vorrangig aus, im Vergleich zu Gusseisen, belastbareren gewalzten Eisenschienen und verband verschiedene Kohlengruben mit den Ortschaften Shildon, Darlington und Stockton-on-Tees. Die Strecke wurde explizit gebaut, um die Kohleförderung aus dem Landesinneren nach Stockton, wo die Kohle auf Schiffe verladen wurde, zu beschleunigen. Dies wurde notwendig, um dem zunehmenden Bedarf an Kohle, aufgrund der neu eingeführten Dampfmaschinen, der Erz-Verhüttung und dem Heizbedürfnis in London sowie anderen großen Städten, entgegenzuwirken.

Stephenson kopierte für seine Locomotion No.1 die Spurweite<sup>1</sup> der regionalen britischen Kohlewagen (ca. 1.42 m). Aus technischen Gründen musste eine geringe Verbreiterung der Spurweite stattfinden, welche zur einer Spurweite von 1435 mm führte. Diese Spurweite wird aktuell als Normalspur verstanden. Sie ist die Standardspurweite in Nordamerika, China und weiten Teilen Europas inklusive Österreich.

<sup>1</sup>Abstand zwischen den spurführenden Elementen

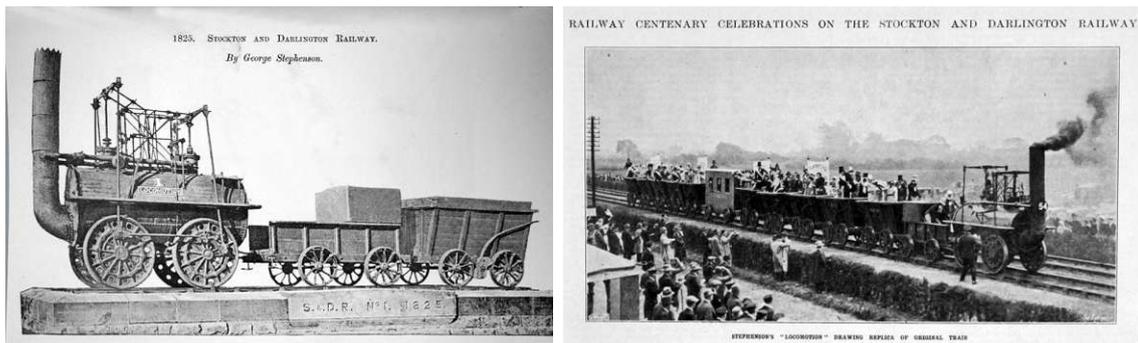


Abbildung 1.3: Locomotion No.1 & Eröffnung der 1. Eisenbahnstrecke [Grace's Guide, 2019]

Mit der Eisenbahn erlebte der Verkehr einen Umbruch. Für den Gütertransport, den Personenverkehr und für die Nachrichtenübermittlung begann eine neue Epoche. Erstmals konnten Massen an Produkten und Rohstoffen für die Industrie über weite Strecken sicher und zeitnah transportiert werden. Die Eisenbahn schuf damit den Grundstein für eine dynamische und mobile Gesellschaft sowie die Voraussetzungen für die Entstehung von großen einheitlichen Märkten. Die Eisenbahn war somit die Initialzündung der industriellen Revolution. Ihr Siegeszug in ganz Europa und in der Übersee, ausgehend von Großbritannien, begann [Tzanakakis, 2013].

Ab Mitte des 20. Jahrhunderts wurde der globale Einsatz von Dampflokomotiven sukzessive durch modernere Dieselantriebe sowie insbesondere durch elektrische Lokomotiven ersetzt. Geblieben ist ein ikonisches, nostalgisches Monument der Eisenbahntechnik von historischer Bedeutung und eine der bedeutendsten Erfindungen der industriellen Revolution (Abbildung 1.4).



Abbildung 1.4: Prominenter Vertreter der Dampflokomotiv-Epoche: Pennsylvania Railroad Class K-4s; Baujahr 1914–1928 [Rail Archive, 2019]

## 1.2 Die Eisenbahn im 21. Jahrhundert

Die Eisenbahn hat im Transportwesen zwar deutliche Konkurrenz erfahren, sticht allerdings durch einige Überlegenheiten hervor. Ein hoher Automatisierungsgrad senkt den Personalaufwand pro Tonnenkilometer im Vergleich zu anderen Verkehrsträgern wie der Straße. Aufgrund der Spurführung bietet der Schienenverkehr eine hohe Transportsicherheit, zählt damit zu den sichersten Verkehrsmitteln insgesamt und eignet sich besonders für den Transport von Gefahrgütern. Ferner sorgt ein geringer Rollwiderstand für den energieeffizienten Landtransport großer Mengen oder Massen von Gütern. Durch diese Vorteile in Bezug auf Sicherheit und Umweltfreundlichkeit ist die Bahn aus dem modernen Alltag sowie für das reibungslose Funktionieren der Wirtschaft nicht wegzudenken.

Als Antrieb werden fast ausschließlich Elektro-Lokomotiven und -Triebwagen genutzt. Sie gelten durch Verwendung erneuerbarer Energiequellen bei der Stromerzeugung (in Österreich > 90 %), als umweltfreundlich. Des Weiteren verfügen Elektromotoren bereits beim Anlaufen das volle Drehmoment, weshalb eine E-Lok sehr schnell beschleunigen und hohe Zugkräfte erreichen kann. Ein großer Nachteil ist die notwendige Stromversorgung und somit teure Infrastruktur. Dies berechtigt die Verwendung des sonst nachteiligen Diesel- bzw. Dieselhybridantriebes, welcher unabhängig von einer Oberleitung und somit in elektrisch unerschlossenen Gebieten agieren kann. Werden aktuell getestete neue Antriebstechnologien (Wasserstoff und Elektro/Akku-hybrid) serientauglich, wird der Dieselantrieb weiter an Bedeutung verlieren. [Schienen Control, 2019], [UIC, 2019].

Beginnend mit Tabelle 1.1, wird im Folgenden eine kurze Einsicht der globalen und österreichischen Eisenbahninfrastruktur gegeben. Dies dient zum Verständnis der Größenordnung bzw. der Relevanz der Eisenbahn und vermittelt infolgedessen den Hintergrund dieser Arbeit. Abbildung 1.5 zeigt die Dichte des Schienennetzes in einem globalen Kontext. Markant ist die hohe Dichte im europäischen Raum.

Gebiet	Schienenlänge [km]	globaler Anteil [%]
Amerika	386 120	34
Asien und Ozeanien	327 736	28
Europa (inkl. Türkei)	271 791	24
Russland	85 375	7
Afrika	77 597	7
$\Sigma$	1 148 619	100

Tabelle 1.1: Globale Verteilung der Schienenlänge, Stand: 2017 [UIC, 2019]

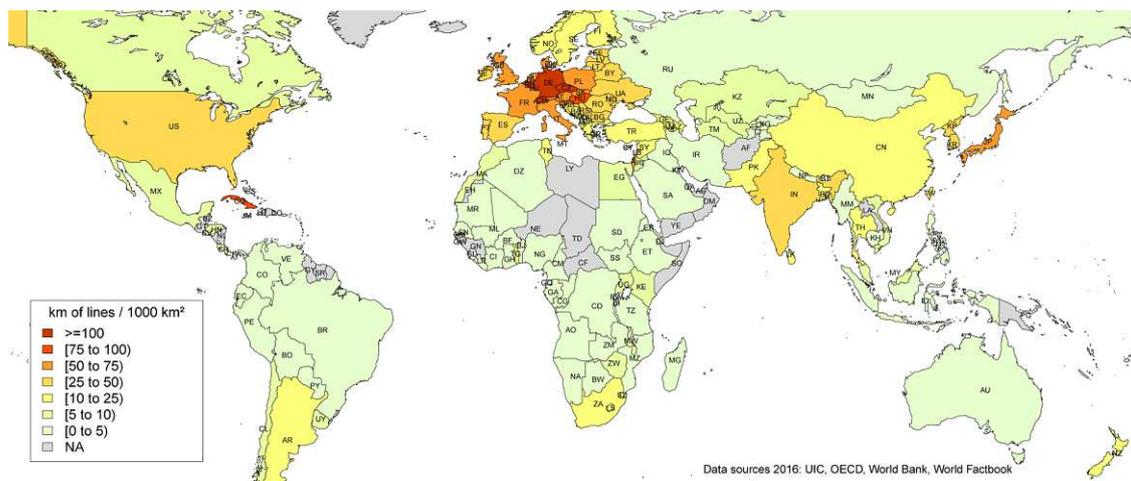


Abbildung 1.5: Dichte des Schienennetzes (Schienenkilometer/1000 km<sup>2</sup>)  
Stand: 2017 [UIC, 2019]

Etwas detaillierter wird die Lage in Österreich betrachtet. Derzeit sind in Österreich 69 Eisenbahnunternehmen vertreten. Sie gliedern sich in 50 Eisenbahnverkehrsunternehmen, 8 Eisenbahninfrastrukturunternehmen und 11 integrierte Eisenbahnunternehmen. Insgesamt 46 davon sind berechtigt, im Netz der Österreichischen Bundesbahn (ÖBB) Züge zu führen. Die folgende Tabelle 1.2 zeigt einige Eckdaten der Bahn-Infrastruktur in Österreich. Eine umfassende Datenanalyse kann im Jahresbericht der *Schienen Control Kommission* nachgelesen werden. [Schienen Control, 2019].

Gliederung der 46 Unternehmen	
ÖBB	4 Unternehmen
Ausländisches bzw. mehrheitlich-ausländisches Eigentum	10 Unternehmen
Privateigentum	21 Unternehmen
Öffentliches Eigentum	11 Unternehmen
Eckdaten	
Länge des Gleisnetzes	5650 km
Gefahrene Kilometer pro Jahr	149 Mio.
Transportierte Personen pro Jahr	309.9 Mio.
Strecke pro Einwohner und Jahr	1435 km
Nettotonnenkilometer (Güterverkehr) pro Jahr	23734 Mrd.
Anzahl Lokomotiven	1335
Anzahl Triebwagen	748
Elektrische Abdeckung der Gleise	73 %

Tabelle 1.2: Auszug aus dem Schienen Control Jahresbericht 2018 [Schienen Control, 2019]

Die genannten Daten weisen auf den Umfang des Eisenbahnnetzes und die hohe Beanspruchung sämtlicher beteiligter Konstruktionselemente hin. Die Beschaffenheit dieser Elemente hat einen wesentlichen Einfluss auf Sicherheit, Komfort, Fahrverhalten, Fahrdynamik sowie das Verschleißverhalten der Fahrzeugräder und des Gleiskörpers selbst. Die Erhaltung einer optimalen Beschaffenheit setzt eine regelmäßige Wartung, Analyse und Instandsetzung voraus. Die Entwicklung von mechanisierten Arbeitsmethoden für diese Tätigkeit wurde entscheidend geprägt durch Innovationen der Plasser & Theurer G.m.b.H.

## 1.3 Motivation & Gliederung der Arbeit

Plasser & Theurer ist ein im Jahre 1953 gegründetes, österreichisches Privatunternehmen und Komplettanbieter von Maschinen für den Eisenbahninfrastrukturneubau, Umbau und dessen Erhaltung. Die Firma besteht aus rund 1900 Mitarbeitern in Österreich mit Firmenzentrale in Wien und dem Stammwerk in Linz. Die Produktpalette bietet ein breites Spektrum an gleisgebundenen Fahrzeugen und reicht von einfachen Stopfmaschinen bis hin zu 200 m langen Hochleistungsmaschinen [Plasser & Theurer, 2019].

In der vorliegenden Arbeit steht die sogenannte *Schotterbettreinigungsmaschine* im Mittelpunkt bzw. vielmehr die automatische Steuerung ihrer Aushubkette. Die erforderlichen Genauigkeiten für diese Steuerung liegen bei 1 cm ( $1\sigma$ ). In vielen Fällen wird dies über ein Leitseil bewerkstelligt. Diese Methode ist genau, aber personal- und kostenaufwendig, weshalb ein großer Bedarf nach alternativen Methoden besteht. Eine Option ist die Einbindung von präzisen (Echtzeit)-Messmethoden anhand *globaler Navigations-Satellitensysteme* (engl. Global Navigation Satellite System, GNSS). Im Zuge dieser Arbeit wird primär evaluiert, welche *Voraussetzungen* gegeben sein müssen, um präzise kinematische Positionsgenauigkeiten durch GNSS erzielen zu können. Ferner werden *Einschränkungen und Grenzen* sowie die zu erwartenden Genauigkeiten verschiedener GNSS-Methoden betrachtet. Folgende fünf Schwerpunkte werden untersucht:

- i. Welche Messmethoden können hohe Genauigkeiten leisten?
- ii. Unter welchen Bedingungen lässt sich die gewünschte Genauigkeit erreichen?
- iii. Sind unterschiedliche Genauigkeiten hinsichtlich globaler Einsätze zu erwarten?
- iv. Ist der Korrekturdatenempfang allerorts möglich?
- v. Wie viele Strecken der ÖBB erfüllen diese Anforderungen?

## **Gliederung der Arbeit:**

### Kapitel 2: Grundlagen

Hier wird der Aufbau des Gleises konkretisiert und allgemein erklärt, weshalb eine Gleisinstandhaltung nötig ist. Vertiefend wird das Schotterbett behandelt, welche Rolle dabei die Schotterbetteinigungsmaschine trägt und wie diese aktuell arbeitet. Anschließend werden das Prinzip, der Aufbau und die Eigenschaften der Satellitennavigation erklärt.

### Kapitel 3: Präzise GNSS-Methoden

Durch Reduzierung des Fehleranteils kann mithilfe von GNSS-Messungen eine Positionsgenauigkeit von wenigen Zentimetern bis in den Subzentimeter-Bereich erreicht werden. Dies wird als präzise GNSS-Positionierung verstanden. In Kapitel 3 werden die verschiedenen präzisen Methoden behandelt und bewertet.

### Kapitel 4: Einschränkungen und Voraussetzungen

Ein Hauptaugenmerk der Arbeit wird auf die Einschränkungen und Voraussetzungen der präzisen GNSS-Methoden gelegt. Hier wird über die Schwierigkeit von qualitativen Aussagen einer räumlichen Limitation der Datenübertragung informiert. Ferner werden Abhängigkeiten bezüglich Satellitenanzahl- und konstellation, Positionsgeschwindigkeit und Messfrequenz behandelt.

### Kapitel 5: Praxis

Abschließend werden in Kapitel 5 die theoretischen Aussagen anhand von Messfahrten überprüft. Der genaue Messablauf wird erklärt und die Ergebnisse diskutiert.

### Kapitel 6: Zusammenfassung

Die eingangs gestellten fünf Fragen werden mit den gewonnenen Ergebnissen der Arbeit in Zusammenhang gebracht und qualitative Antworten abgeleitet.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Gleisstandhaltung

Eine Gleisanlage ist eine industrielle Konstruktion. Sie obliegt wie jede industrielle Anlage einer regelmäßigen Wartung bzw. Instandhaltung mit der Aufgabe, eine möglichst optimale Nutzung und eine hohe technische Verfügbarkeit der Anlage zu gewährleisten. Die Wartungsintervalle richten sich nach Beanspruchung der jeweiligen Komponenten. Die Hauptkomponenten des Oberbaus bilden die Schienen, verschiedene Ausführungen von Schwellen, Schienenbefestigungen und das Schotterbett. Das dach- oder pultförmige Planum definiert die Grenze zum Unterbau. Es dient zur seitlichen Abführung des einsickernden Oberflächenwassers aus dem Schotterbett.

Je nach Bauteil ergeben sich verschiedene (durchschnittliche) Intervalle der Wartung. Im Fokus dieser Arbeit steht das Schotterbett, im Speziellen seine Reinigung bzw. Erneuerung durch eine automatisierte präzise Steuerung. Es hat im Vergleich zu anderen Komponenten (z. B. Schienenerneuerung 12–15 Jahre) eine eher lange Lebenserwartung von 20–30 Jahren. Die Zahlen sind Richtwerte für eine geplante Instandhaltung. Zusätzlich dürfen spezielle Gefahrgrenzwerte nicht überschritten werden. Wächst z. B. der Abstand zwischen den spurführenden Schienen (Spurweite) über den Gefahrgrenzwert hinaus, so ist akut zu reagieren. Dementsprechend ist der Fehler sofort zu beheben bzw. ist eine Zone mit verringerter Höchstgeschwindigkeit einzurichten [Lichtberger, 2010].

#### 2.1.1 Schotterbettreinigung

Das Hauptmerkmal des klassischen Schotterbettes ist die schwimmende Lagerung des Gleisrosts. Da Schwellen und die darauf liegenden Schienen nur eine geringe Stei-

figkeit besitzen, muss das tragende Schotterbett die Kräfte aufnehmen und in den Untergrund weitergeben können. Eine hohe Tragfähigkeit wird durch eine geeignete Wahl der Bettungshöhe und -breite sowie einer hohen Verdichtung von hochwertigem Schotter erreicht. Es ergeben sich folgende Forderungen an das Schotterbett [Lichtberger, 2010]:

- gleichmäßige Übertragung des Schwellendrucks auf den Untergrund,
- größtmöglicher Widerstand gegen Verschiebung der Schwellen,
- möglichst einfache Wiederherstellung der Gleislage und Gewährleistung von Korrekturmaßnahmen,
- optimale Wasserdurchlässigkeit zur Erhaltung des tragfähigen Untergrundes,
- Erhaltung notwendiger Gleiselastizität zur Reduktion dynamischer Kräfte.

### Tragfähigkeit des Schotterbettes

Definiert wird die Tragfähigkeit durch die Scherfestigkeit  $\tau_f$ . Sie entspricht dem Widerstand gegen Verschiebung entlang ihrer Innenflächen und wird als Spannung, folglich Kraft pro Fläche, verstanden. Mathematisch kann die Scherfestigkeit  $\tau_f$  als Geradengleichung (2.1) angeschrieben werden.

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (2.1)$$

Dabei ist  $c$  der Verzahnungswiderstand (Haftfestigkeit oder Kohäsion),  $\sigma$  die Vertikalspannung und  $\varphi$  der Winkel der inneren Reibung. Dieser innere Reibungswinkel wird hauptsächlich von der Inhomogenität des Korns, der Korngröße, der Kornform und der Kornrauhigkeit beeinflusst. Abbildung 2.1 zeigt den Graph der Geradengleichung. Ein großer Reibungswinkel (Steigung) erhöht folglich die Scherfestigkeit [Klotzinger, 2008].

Als Bettungsstoff eignet sich Hartschotter (Basalt, Granit, Diabas) ohne Fremdkörper wie z. B. Lehm oder Erde. Diese Gesteinstypen sind sehr witterungsbeständig und besitzen eine große Druckfestigkeit. Üblich sind Bruchstücke in der Größenordnung von 25–60 mm (Skelettkorn) für Hauptgleise. Etwas kleinere Korngrößen finden bei Nebengleisen Anwendung. Sowohl die Korngröße und -form verändern sich durch

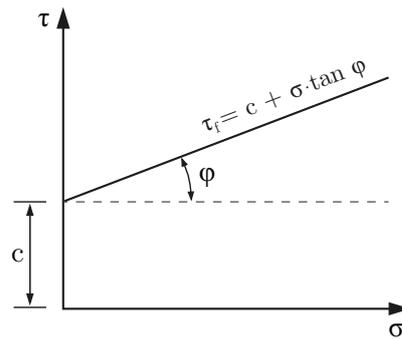


Abbildung 2.1: Scherfestigkeit  $\tau_f$ ; in Anlehnung an [Klotzinger, 2008]

Belastung. Für die primäre Belastung sorgt der dynamische Schienenverkehr. Diese Kräfte fördern den allmählichen Kornverschleiß (Abrieb, Bruch, Umlagerungen).

In einem neu hergestellten Bett, welches fast ausschließlich Skelettkorn enthält (> 95 %), bildet sich dadurch nun kleineres Distanzkorn. Geringe Mengen (< 15 %) verbessern die Scherfestigkeit. Diese Distanzkörner häufen sich mit zunehmender Belastungsdauer (Alter). Zusätzlich entsteht das Füllkorn, ein noch kleineres Gestein (Abbildung: 2.2). Es umschließt das Skelettkorn, wodurch der Reibungswinkel verringert wird und die Scherfestigkeit und somit die gesamte Tragfähigkeit des Schotterbettes abnimmt [Lichtberger, 2010].

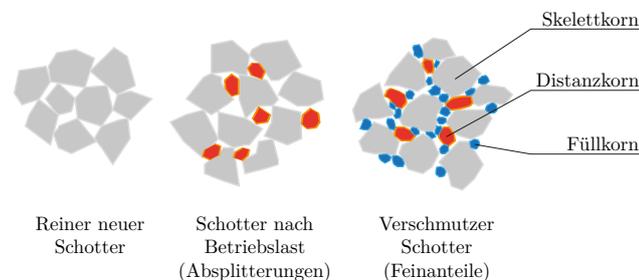


Abbildung 2.2: Skelettkorn, Distanzkorn und Füllkorn; in Anlehnung an [Klotzinger, 2008]

## Verschmutzung des Schotterbettes

Das Schotterbett unterliegt neben der Verkehrsbelastung noch vielen weiteren externen Einflüssen. Infolge fehlender Querneigung des Planums können sich Wassersäcke bilden. Hier sammelt sich Wasser bzw. Eis, wodurch Frosthebungen und -ausbrüche die Folge sein können. Wassersäcke und Mulden im Planum fördern auch den Pumpeneffekt. Er entsteht durch die unregelmäßige Belastung der Züge. Durch diesen Effekt dringt Untergrundmaterial in das Schotterbett ein, welches den Verschmutzungsgrad erhöht.

Auch Verunreinigungen des Schotters durch Ladegutverluste (Kohle, Sand, etc.) sowie Winderosion, Ablagerungen aus der Luft, Laubanfall und Wildkrautbewuchs verschmutzen das Schotterbett und wirken sich nachteilig auf die in Kapitel 2.1.1 genannten Forderungen aus.

Zuletzt führen Instandhaltungsmaßnahmen wie Stopfungsvorgänge zu Kornabrieb. Bei diesem Vorgang wird der Schotter unter der Schwelle verdichtet, wodurch wieder ein stabiles Schwellenaufleger entsteht. Dieser Anteil ist allerdings gegenüber der vorrangigen Abnutzung durch die Verkehrsbelastung kaum bemerkbar.

Die Gesamtheit dieser Effekte führt zu einer fortschreitenden Verschmutzung und somit zu einer Verminderung der Scherfestigkeit. Tabelle 2.1 zeigt einen quantitativen Vergleich von verschiedenen Stadien/Verschmutzungsgraden des Schotterbettes, welche die Tragfähigkeit reduzieren und somit zu unerwünschten, fortschreitenden räumlichen Veränderungen des Gleiskörpers führen [Lichtberger, 2010], [Klotzinger, 2007].

Bezeichnung	Verzahnungsanteil $c$ [N/cm <sup>2</sup> ]	Reibungswinkel $\varphi$ [°]	$\tan \varphi$
Aufbereiteter Schotter	9.20	65.20	2.16
Gereinigter Schotter	8.10	63.40	2.00
Verschmutzter Schotter	5.20	57.70	1.58
Rundkies	4.20	57.40	1.56

Tabelle 2.1: Verzahnungsanteil und innerer Reibungswinkel verschiedener Schottermaterialien [Klotzinger, 2008]

### Setzung des Schotterbettes

Typischerweise treten im Frühstadium eines Schotterbetts rasche Setzungen ein, sogenannte Konsolidierungseffekte, welche die Festigkeit des Schotterbetts weiter erhöhen. Trotz denkbar gleichen Randbedingungen streuen Setzungen allgemein sehr stark. Gründe dafür sind die zufällige Kornanordnung, die inhomogene Gestalt der Verdichtung sowie divergente Umwelteinflüsse. Verstärkt wird diese inhomogene Setzung durch den zunehmenden Feinteilgehalt. Maßnahmen wie die Reinigung der Bettungsflanken oder Stopfungen sind nur von temporärem Charakter und dienen oft als Überbrückungsmaßnahmen. Sie sind effektiv bei leichter Verschmutzung. Ist die Bettung jedoch stark verunreinigt, fällt das Gleis selbst nach kürzlich erfolgter Stopfung wieder zurück in eine unerwünschte Lage.

Folglich verfügt ein Schotterbett je nach Einsatzdauer und Beanspruchung über eine begrenzte Lebensdauer, nach welcher es erneuert werden muss. Bewährt hat sich ein Grenzwert von maximal 30 % Feinteilgehalt. Dies entspricht einer Körnung von  $< 22.4$  mm (die Körnung bezeichnet jenes Material, welches durch ein 22.4 mm Quadratlochsieb fällt). Ab diesem Wert ist eine Schotterbettreinigung durchzuführen. Fahrten mit Messwagen, die mit geeigneten Analysesystemen ausgestattet sind, sind notwendig, um Daten für eine Zustandsbeschreibung aufzunehmen. Dadurch lässt sich frühzeitig die Notwendigkeit der Reinigung objektiv abschätzen [Hauke & Auer, 2016], [Lichtberger, 2010].

### 2.1.2 Reinigungsmaschine

Die Reinigung des Schotterbetts erfolgt durch speziell dafür entwickelte Reinigungsmaschinen. Diese Bettungsreinigungsmaschinen sind grundsätzlich zuständig für:

- kontinuierliches Abtragen des Bettungsmaterials mit einer geführten Kette,
- Transport von mehreren Tonnen Material innerhalb der Maschine,
- das Sieben des verschmutzten Schotters,
- das Wiedereinführen des gereinigten Schotters an die Aushubstelle,
- Abtransport des Abraumes.

Moderne Reinigungsmaschinen (siehe Abbildung 2.3) sind so konstruiert, dass sie diese Forderungen mit möglichst hoher Qualität erfüllen können [Lichtberger, 2010]. Aufgrund unterschiedlicher Anforderungen sind auch verschiedene Ausführungen von Reinigungsmaschinen nötig, woraus sich die Leistung und Fahrgeschwindigkeit der Maschinen ergeben.

Mögliche Anforderungen sind Reinigungskilometer pro Jahr, Verschmutzungsgrad des Schotterbettes oder Anzahl und Länge der Sperrpausen. Des Weiteren ist auf geometrische Faktoren wie Gleisabstand, maximale Steigung, minimale Arbeitsradien und dem Regellichtraum zu achten [Hauke & Auer, 2016]. Der Regellichtraum ist rechtlich definiert und beschreibt den zu jedem Gleis gehörenden, freizuhaltenden Raum. Er setzt sich aus dem für die ungehinderte Fahrt der Schienenfahrzeuge erforderlichen Raum und zusätzlichen Räumen für bauliche und betriebliche Zwecke zusammen. Er dient somit der gefahrlosen Befahrung der Gleiskörper [BGBl., 2008].



Abbildung 2.3: Standard-Bettungsreinigungsmaschine (RM 80 UHR) mit einer Aushubkette und einer Siebanlage [Plasser & Theurer, 2019]

Durch den Regellichtraum ergibt sich gegebenenfalls eine Einschränkung bezüglich der Größe der Reinigungsmaschine.

Das Resultat einer Reinigung und die sich daraus ergebende Qualität des Schotterbettes sind primär von zwei Elementen der Reinigungsmaschine abhängig; von der Vibrationssiebanlage und von der geführten Aushubkette. Die Vibrationssiebanlage ist das eigentliche Herzstück der Reinigungsmaschine. Ihre Optimierung erfolgt über verschiedene variable Größen wie Siebfläche und -anzahl, Anstellwinkel der Siebböden, Schwingungsart und Frequenz. Dessen ungeachtet ist das zentrale Thema der vorliegenden Arbeit die Steuerung der Aushubkette, weshalb für nähere Informationen bezüglich der Siebanlage, Siebqualität, Aufbau und Funktion auf die Literatur (Handbuch Gleis, Kapitel 15) verwiesen wird [Hauke & Auer, 2016].

### Aushubkette

Die Aushubkette erfasst die gesamte Breite der Bettung, um diese in einem Arbeitsschritt auszuheben. Sie muss bis zum Planum gelangen, um alle Feianteile, welche sich vermehrt im unteren Bereich befinden, zuverlässig zu erfassen. Essentiell ist dabei die präzise Führung der Kette. Diese stellt einen ebenen und geraden Planumsschnitt sowohl in Längs- als auch in Querrichtung sicher. Der Schnitt in

Querrichtung (Neigung 3–5 %) ist relevant für einen korrekten Wasserabfluss. Der gleichförmige Schnitt in Längsrichtung wiederum ist wesentlich für den Liegecharakter der Gleise. Diese haben die Eigenschaft, sich über Jahre hinweg dem Planum anzupassen. Fehler im Planum wirken sich somit direkt auf das Gleis aus. Dies bedeutet einen erhöhten Wartungsaufwand bzw. höhere Lebenserhaltungskosten [Hauke & Auer, 2016].

Die Höhe der Aushubkette ist von der Maschinenart abhängig, da sie an die Dimensionen der Förderkanäle sowie an die Größe der Siebanlage angepasst ist. Die Ketten bestehen hauptsächlich aus Kratzerschaufeln mit zwei bis fünf Fingern, Zwischengliedern und Bolzen (Abbildung 2.4).

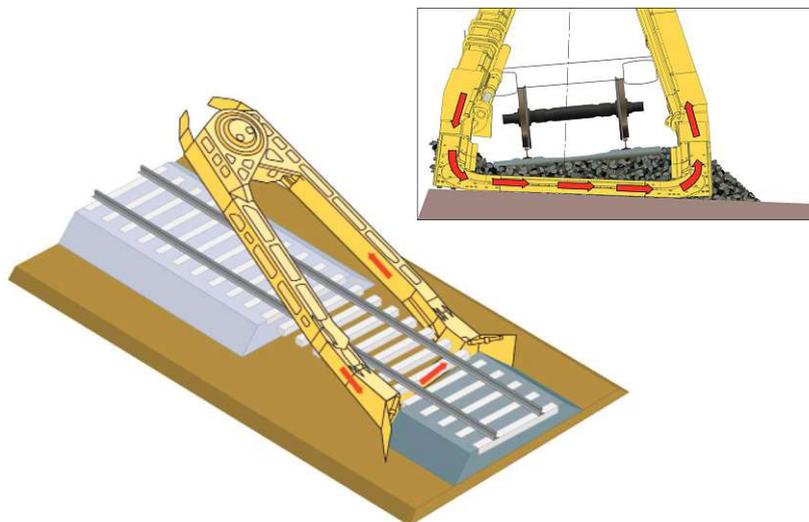


Abbildung 2.4: geführte Aushubkette [Misar, 2004]

Allgemein lösen die Finger das verkrustete Material, welches über die Kettenführungen zu einem Sammeltrichter auf eine Förderbandanlage transportiert wird. Diese wiederum befördert das Material zur Siebanlage. Die Kette wird unterhalb des Gleises in einem Räumebalken geführt. Er gewährleistet den gleichförmigen Schnitt. Die Tiefe der Räumung beträgt bei der in Abbildung 2.3 gezeigten Maschine bis zu 1150 mm.

Die abgetragene Materialmenge wird durch den Querschnitt der Kettenführung, den Abstand zwischen den Schaufeln und der Kettengeschwindigkeit definiert. Die Geschwindigkeit ist durch mehrere Faktoren limitiert. Der Hauptfaktor ist der Verschleiß des Kettenmaterials (i. A. Manganhartstahl). Er steigt progressiv zur Geschwindigkeit (siehe Abbildung 2.5). Somit bewirkt eine Steigerung der Ketten-

geschwindigkeit um 10 % eine Verschleißerhöhung von 15–20 %. Bisherigen Erfahrungen zufolge sollte eine Maximalgeschwindigkeit von 3.5 m/s nicht überschritten werden.

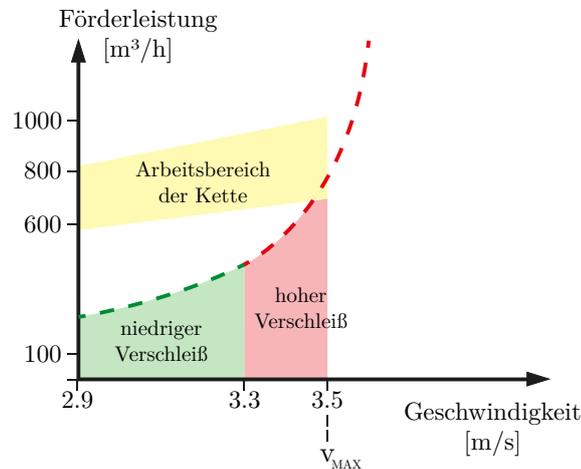


Abbildung 2.5: Kettenverschleisskurve und Förderleistung; in Anlehnung an [Misar, 2004]

Ein weiterer Umstand ist die erhöhte Lärmentwicklung für die Beschäftigten als auch für die Umwelt. Letztlich können zu hohe Kettengeschwindigkeiten den Auswurf von Material bedeuten. Das bedeutet, dass Teile vom Material nicht in den Auffangtrichter gelangen. Sie werden von der Kette in das Schotterbett zurück transportiert und sozusagen im Kreis befördert [Misar, 2004].

Hochleistungs-Bettungsreinigungsmaschinen des Herstellers Plasser & Theurer wie die RMW 1500 verfügen über zwei Aushubketten und eine Gesamtlänge von mehr als 100 m. Die nachfolgende Tabelle 2.2 gibt einen Auszug des Datenblattes der RMW 1500 wieder. Der Auszug dient zur Ersichtlichmachung der Förderleistungen von leistungsstarken Maschinen [Wiebe, 2018].

Hersteller	Plasser & Theurer	Gewicht	451 t
Arbeitsgeschwindigkeit	700 m/h	Gesamtlänge	150.11 m
Achszahl	22	Bettungsreinigung	max. 1500 m <sup>3</sup> /h
Vollaushub (Schotter & Boden)	max. 1000 m <sup>3</sup> /h	Vollaushub (und Reinigung)	max. 500 m <sup>3</sup> /h

Tabelle 2.2: Datenblattauszug der Hochleistungsreinigungsmaschine RMW 1500 [Wiebe, 2018]

### 2.1.3 Steuerung der Aushubkette

Aktuell wird der kontinuierliche Vortrieb mit einer lasergestützten Führung der Aushubkette bzw. auch mit dem älteren Verfahren der Leitseilführung sichergestellt.

Beim lasergestützten Verfahren wird auf der Aushubkette ein Laser-Empfänger angebracht. Seine Nullposition definiert die erwünschte Räumtiefe. In bis zu 300 m Entfernung vor dem Empfänger wird nun ein Rotationslaser positioniert. Die durch den Laser erzeugte Referenzebene wird parallel zum Gleis ausgerichtet. Während sich die Maschine im Vortrieb befindet, wird die Höhenlage der Kette hydraulisch justiert, um sie während der Fahrt in Nullposition des Empfängers zu halten. Da der Laser lediglich eine Ebene erzeugen kann, kann es zu Problemen bei Neigungsänderungen der Gleis-Solllage kommen. Er muss infolgedessen immer exakt auf Punkten mit Neigungsänderung aufgestellt werden. Diese Methode kann auch direkt mit Absoluthöhen aus einem Referenzsystem in Verbindung gebracht werden, indem der Laser über Festpunkten aufgestellt wird. Die Festpunkte sind bei der Österreichischen Bundesbahn (ÖBB), der Deutschen Bahn (DB), der Schweizerischen Bundesbahn (SBB) und bei vielen weiteren Bahnbetreibern in anderen Ländern entlang der Strecke, entsprechend eines hierarchischen Systems (Referenznetz, Verdichtungsnetz), ein- oder beidseitig vermarktet.

Ein Alternativverfahren ist die Methode mit Leitseil. Dabei dient ein Seil als Bezug zur Gleisachse. Es wird einseitig vom Gleis, präzise parallel zur Gleisachse geführt. Ausgehend von diesem Leitseil kann die Maschine durch einen Bügel die Position ablesen. Diese Methode ist sehr genau, jedoch sehr personal- und kostenaufwendig.

Die eigentliche Führung der Aushubkette erfolgt automatisch nach den entsprechend gemessenen Werten oder wird manuell von der Arbeitskabine aus gesteuert [Lichtberger, 2010].

## 2.2 Globale Navigations-Satellitensysteme

Der folgende Abschnitt 2.2 orientiert sich weitgehend an den zwei Werken „Understanding GPS/GNSS-Principles and Applications“ von Kaplan & Hegarty und „Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems“ von Teunissen & Montenbruck.

Die Navigation ist allgemein definiert als die Fähigkeit, Objekte oder Personen zu lokalisieren und an einen gewünschten Ort zu weisen. Obwohl ursprünglich aus der Nautik, findet die Navigation heute in verschiedensten Disziplinen Anwendung. Nicht nur die Raumfahrt und der Flugverkehr, auch wir selbst nutzen täglich spezielle Arten der Navigation. Sie ist nötig, um uns an persönlich relevante Orte wie beispielsweise den Arbeitsplatz, ein Lokal, oder auch nur in einen anderen Raum zu führen. Oft erfolgt dies durch die Sichtnavigation, also die bloße Nutzung der Augen und markanter Punkte sowie Strukturen im Umfeld. Genügt dies nicht, können wir Navigationshilfen wie ein generalisiertes Abbild der Umgebung wie z. B. eine Karte verwenden. Weitere Hilfen, wie der Kompass und Instrumente zur Geschwindigkeitsmessung bzw. Zeit- und Streckenmessung, führen zur Koppelnavigation. Hier folgt die Ortsbestimmung aufgrund von Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit. Eine weitere Möglichkeit ist die Nutzung von elektromagnetischen Wellen. Der Empfang dieser Wellen oder aufmodulierter Signale ermöglicht dem Nutzer seine Position zu bestimmen. Dabei führt der Signalempfänger des Nutzers sämtliche notwendigen Berechnungen durch, um den gesuchten Standort zu errechnen. In einigen Anwendungen wird die Berechnung der empfangenen Signale auch extern durchgeführt.

Anfang der 1960er Jahre gab es mehrere US-amerikanische Regierungsorganisationen, wie das *Department of Defense* (DOD), die *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) und das *Department of Transportation* (DOT), welche interessiert waren, ein künstliches Satellitensystem zur Aussendung solcher Signale zu entwickeln. Ansprüche waren die dreidimensionale Positionsbestimmung, eine globale Abdeckung, Allwettertauglichkeit und eine möglichst hohe Genauigkeit. Es folgte das Satellitensystem Transit (auch Navy Navigation Satellite System, NNSS), welches 1964 militärisch und ab 1967 auch zivil genutzt wurde. Es ist somit das erste *globale Navigations-Satellitensystem*. Transit wurde mit vielen Einschränkungen (zweidimensionale Positionsbestimmung, niedriges Signalintervall, lange Empfängerverarbeitung) ins Leben gerufen. Auf die Einschränkungen wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Sie zeigen aber, dass mit Transit die Navigation für horizontale,

träge Objekte wie Schiffe möglich war. Die Navigation von Flugzeugen oder anderen dynamischen Nutzern war aufgrund der Einschränkungen jedoch nicht realisierbar. Aus dieser Intention entstand das Konzept für das *Navigational Satellite Timing and Ranging-Global Positioning System* (NAVSTARGPS) oder kurz GPS, dem derzeit praktikabelsten und wohl populärsten Vertreter der GNSS [Kaplan & Hegarty, 2017]. Das GPS dient im Folgenden als Referenz zur prinzipiellen Darstellung der GNSS-Funktionsweise.

### 2.2.1 Prinzip

Das GPS-Prinzip beruht auf der Zeitmessung des Signals von einer bekannten Quelle (Ort) S zum Empfänger U<sup>1</sup>. Diese Zeit (Signallaufzeit  $T_u - T_s$ ) wird mit der Signalgeschwindigkeit  $v$  multipliziert, um den Abstand  $r$  zwischen Sender und Empfänger zu erhalten (2.2).

$$r = (T_u - T_s) \cdot v \quad (2.2)$$

Durch Messen der Signallaufzeiten von mehreren Sendern an bekannten Orten kann der Empfänger seine Position bestimmen.

Als Beispiel (Abbildung 2.6) dient einfachheitshalber eine zweidimensionale Positionierung. Die Uhren von Sender und Empfänger seien synchron und der Zeitpunkt der Signalausendung sowie Signalgeschwindigkeit seien bekannt. Wird nun das ausgesendete Signal vom Empfänger U<sub>1</sub> empfangen und die Empfangszeit  $t_u$  registriert, kann mit (2.2) die Entfernung  $r_1$  zu S<sub>1</sub> ermittelt werden. Mit nur einer Messung ist somit bekannt, dass sich die Empfängerposition auf einem Kreis mit Radius  $r_1$  befindet. Durch gleichzeitigen Empfang eines Signals von S<sub>2</sub> ergeben sich 2 Schnittpunkte. Die Auflösung der Mehrdeutigkeit kann durch eine Entfernungsmessung zu einem weiteren Sender S<sub>3</sub> oder einer bekannten Näherungsposition erreicht werden.

In diesem Beispiel werden zum Verständnis mehrere Annahmen getroffen, welche nur theoretischer Natur sind. Die Annahme, dass die Uhren vollkommen synchron arbeiten, ist technisch nicht umsetzbar. Dies äußert sich durch einen Fehler in der Laufzeitmessung und somit in der Entfernungbestimmung. Die drei Kreise besitzen keinen gemeinsamen Schnittpunkt mehr. Selbst wenn dieser Effekt kompensiert wer-

<sup>1</sup>Die Indizes U und S sind an die englischen Begriffe Source bzw. User angelehnt und werden in der gesamten Arbeit als solche verstanden.

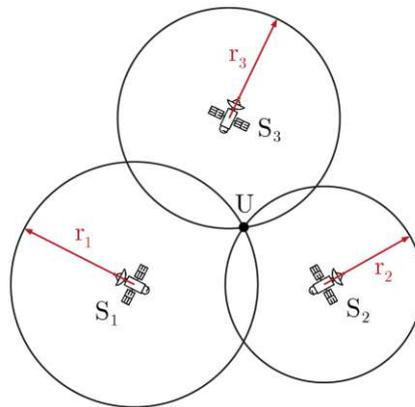


Abbildung 2.6: idealisiertes Prinzip der GNSS-Positionierung;  
in Anlehnung an [Kaplan & Hegarty, 2017]

den könnte, wirken weitere Einflüsse auf die Positionsgenauigkeit. Die Sender sind, im Falle von GNSS, Satelliten in großer Höhe. Bis das Signal den Empfänger erreicht, wird es (genauer die Signal-Laufzeit) durch atmosphärische Effekte beeinträchtigt. Über weitere Effekte wird später genauer (siehe 2.2.7) diskutiert.

Im Gegensatz zu den (Empfänger-)Uhrenfehlern sind diese Signallaufzeitverzögerungen nicht für alle Messungen gleich. Sie beeinflussen jede Messung auf vielfältige Weise. In Abbildung 2.7 wird das durch diese Effekte  $\epsilon_i$  beeinflusste Prinzip anhand strichlierter Kreise dargestellt.

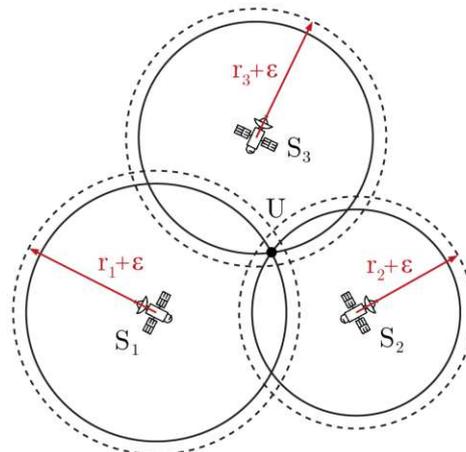


Abbildung 2.7: Auswirkung der Fehler auf das Prinzip der GNSS-Positionierung;  
in Anlehnung an [Kaplan & Hegarty, 2017]

Die Uhr an Bord des Satelliten legt die Sendezeit fest. Diese interne System-Zeit ist synchronisiert mit sämtlichen GPS-Satelliten/Empfängern und ist bekannt als GPS-Systemzeit (engl. GPS-Time, GPST). Übertragen wird die Information des Sendezeitpunkts im gesendeten Signal. Anders als in der zweidimensionalen Prinzipklärung erfolgt im realen (räumlichen) Fall die Signalausbreitung nicht kreis-

förmig, sondern kugelförmig. Hier würden zwei synchrone Sender eine Schnittkurve erzeugen. Eine dritte Kugel schneidet sich mit diesen in zwei Punkten. Für Nutzer auf der Erdoberfläche ist es jedoch zweifelsfrei, dass nur der erdnahe Punkt die wahre Position ist.

Wie erwähnt sind die Satelliten- und Empfängeruhren nicht perfekt synchronisiert, sondern weisen einen systematischen Zeitversatz auf. Dies beruht zum Teil auf der Frequenzerzeugung der Satellitenuhren (Cäsium- und/oder Rubidiumatomuhren). Diese Uhren sind zwar sehr stabil, dennoch kann eine perfekte Synchronisation zwischen der Signalsendezeit und der Zeit des GPS-Systems nicht erreicht werden. Der zweite Teil rührt von den Empfängeruhren. Sie verfügen meist über weit weniger stabile Quarzuhren und liefern damit einen großen Betrag zur Ungenauigkeit in der Distanzmessung. Diese verfälschte Messung bzw. die daraus errechnete Strecke wird umbenannt in Pseudostrecke  $\rho$ . Sie enthält somit den reinen geometrischen Anteil  $r$ , einen Offset  $\delta t_u$  bezüglich Systemzeit und Empfängeruhr sowie einen Offset  $\delta t_s$  bezüglich Systemzeit und Satellitenuhr. Gleichung (2.2) kann nun umgeschrieben werden in (2.3).

$$\begin{aligned}\rho &= [(T_u + \delta t_u) - (T_s + \delta t_s)] \cdot v = \\ &= (T_u - T_s) \cdot v + (\delta t_u - \delta t_s) \cdot v = \\ &= r + (\delta t_u - \delta t_s) \cdot v\end{aligned}\tag{2.3}$$

Das GPS-Bodenüberwachungsnetzwerk bestimmt die Korrekturen für den Offset der Satellitenuhren  $\delta t_s$  und überträgt diese Korrekturen an die Satelliten zur erneuten Übertragung an die Nutzer. Der Offset wird dadurch im Nutzerempfänger nahezu kompensiert. Die kleinen Restbeträge werden an dieser Stelle nicht betrachtet. Die Unbekannten sind somit drei Empfänger-Koordinaten  $x_u, y_u, z_u$  und der Empfängeruhrfehler  $\delta t_u$ . Um ein Gleichungssystem mit vier Unbekannten zu lösen, sind mindestens vier Beobachtungsgleichungen nötig und damit die Sichtbarkeit zu mindestens vier Satelliten erforderlich. Eine Pseudostrecke kann nun wie folgt angeschrieben werden (2.4). Der Index  $i$  steht hier für die verschiedenen Satelliten und deren Positionen [Kaplan & Hegarty, 2017].

$$\begin{aligned}\rho_i &= (x_i - x_u)^2 + (y_i - y_u)^2 + (z_i - z_u)^2 + v \cdot \delta t_u = \\ &= f(x_u, y_u, z_u, \delta t_u)\end{aligned}\tag{2.4}$$

## 2.2.2 Koordinatensysteme

Ein Koordinatensystem ermöglicht es, die Lage von Punkten durch Zahlentupel (Koordinaten) innerhalb dieses Systems eindeutig festzulegen. Notwendige Größen zur Definition eines Koordinatensystems sind dabei der Ursprung, die Koordinatenachsen sowie der Maßstab entlang der Koordinatenachsen. Die Positionen derselben Punkte können in unterschiedlichen Koordinatensystemen dargestellt werden. Die am häufigsten verwendeten Systeme sind affine Koordinatensysteme und Polarkoordinatensysteme. Ein bekannter Vertreter und Spezialfall affiner Systeme ist das kartesische Koordinatensystem. Hier liegen alle Achsen orthogonal zueinander. Ist auch der Maßstab entlang aller Raumrichtungen gleich, wird es als *orthometrisches Koordinatensystem* bezeichnet.

### Inertiales geozentrisches Koordinatensystem

Um Satellitenpositionen zu beschreiben, eignet sich ein *inertiales geozentrisches Koordinatensystem* (engl. Earth-Centered-Inertial-System, ECI-System). In solch einem System erfährt ein Körper keine Beschleunigung ohne äußere Krafteinwirkung, es gilt das 1. Newton'sche Axiom. Der Ursprung des ECI-Systems liegt im Massenzentrum der Erde. Die Koordinatenachsen zeigen in feste Richtungen bezüglich eines inertialen Raumes. In typischen ECI-Koordinatensystemen liegt die xy-Ebene in der Äquatorebene und die z-Achse steht orthogonal dazu. Es entsteht ein kartesisches System, in welchem Satellitenpositionen mit dem Koordinatentripel  $x_s, y_s, z_s$  bezeichnet werden. Die präzise Realisierung eines ECI-Systems kann aufgrund von Unregelmäßigkeiten in der Bewegung und Form der Erde und der Anziehungskräfte externer Objekte nur unabhängig vom Erdkörper erfolgen. Dies erfolgt durch Messungen weit entfernter, sehr starker Radioquellen, den sogenannten Quasaren. Aufgrund der extremen Entfernungen sind die sphärischen Koordinaten dieser Objekte für uns nahezu stabil. Erst dadurch ist ein (lokales<sup>2</sup>) *Inertialsystem* gewährleistet.

### Erdfestes geozentrisches Koordinatensystem

Aufgrund der Erdrotation ist ein ECI-System zur Positionsbestimmung im Bereich der Erdoberfläche nicht geeignet. Es ist zweckmäßig, ein Koordinatensystem zu de-

<sup>2</sup>Jedes System, welches sich mit konstanter Geschwindigkeit relativ zu einem Inertialsystem bewegt, ist ebenfalls ein Inertialsystem. Demnach existieren beliebig viele Inertialsysteme, welche ebenfalls gegeneinander gleichförmig-bewegte Bezugssysteme sind.

finieren, welches sich mit der Erde dreht, ein sogenanntes *erdfestes geozentrisches System* (engl. Earth-Centered-Earth-Fixed-System, ECEF-System). Wie beim ECI-Koordinatensystem liegt im Allgemeinen die xy-Ebene in der Äquatorebene. Anders ist die Ausrichtung der Achsen. Diese sind nicht raumfest, sondern rotieren mit der Erde. Die x-Achse zeigt an einen ausgewählten Äquatorpunkt, welcher  $0^\circ$  entspricht. Normal und mathematisch positiv zur x-Achse in der Äquatorebene liegt die y-Achse und zeigt somit in Richtung  $90^\circ$ , orthogonal zur Ebene liegt die z-Achse. Sie definiert den geographischen Nordpol. Der halbe Längengrad, welcher von einem Pol zum gegenüberliegenden Pol läuft, wird Meridian genannt. Analog dazu wird der Meridian, der die x-Achse schneidet, als Nullmeridian bezeichnet. Wie im ECI-System liegt ein kartesisches Koordinatensystem vor und die Empfängerposition kann durch  $x_u, y_u, z_u$  beschrieben werden.

### Referenzsystem und Referenzrahmen

Neben dem mathematischen Konzept des Koordinatensystems ist ein Bezug zu diesem System notwendig. Er erfolgt durch das sogenannte *geodätische Datum = Referenzsystem + Referenzrahmen*. Es legt die exakte Position und Orientierung des Koordinatensystems durch eine Menge von Parametern bzw. Konstanten fest. Das Referenzsystem wird mit konkreten Positionen durch messbare Festpunkte, dem sogenannten *Referenzrahmen*, realisiert. Aufgrund von Messunsicherheiten und der Variabilität der Erde sind diese Realisierungen nicht perfekt. Zu dem Zweck werden in unregelmäßigen Abständen (Epochen) neue Realisierungen verabschiedet.

Den Referenzrahmen zugrunde liegt ein geeigneter Referenzkörper, um geographische bzw. ellipsoidische Koordinaten zu berechnen, welche mit dem Erdkörper in Verbindung gebracht werden können. (Abbildung 2.8).

Ein Punkt P wird hier durch die ellipsoidische Breite  $\varphi$ , die ellipsoidische Länge  $\lambda$  und die ellipsoidische Höhe  $h$  beschrieben. Die Breite ist der Winkel zwischen Äquatorebene und der Normalen auf die Ellipsoidoberfläche durch P. Die Länge ist der Winkel zwischen Nullmeridian und dem Meridian, welcher P schneidet. Die Höhe ist der Abstand von P zur Oberfläche entlang der Ellipsoidnormalen. Diese schneiden im Allgemeinen nicht den Ursprung. Das geodätische Referenzsystem, auf welches sich GPS-Anwendungen auf der Erde und im erdnahen Raum beziehen, ist das vom DOD entwickelte *World Geodetic System 1984* (WGS 84). Der Referenzkörper ist ein der Erdform bestangepasstes Rotationsellipsoid.

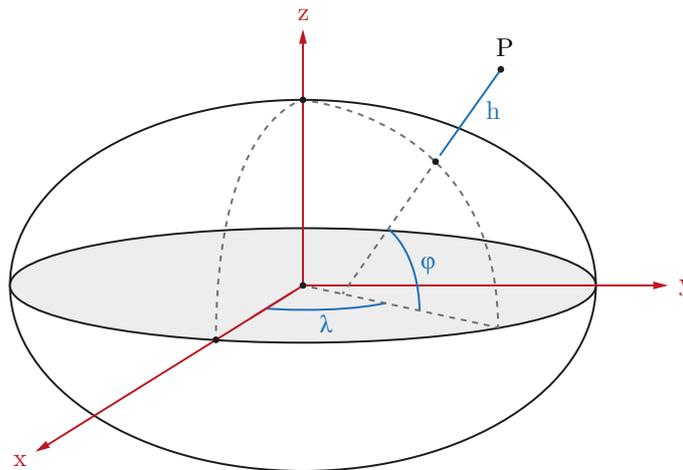


Abbildung 2.8: Veranschaulichung von kartesischen und ellipsoidischen Koordinaten;  
in Anlehnung an [Navipedia, 2018]

Neben dem für GPS verwendeten WGS 84 gibt es noch weitere globale Referenzsysteme, welche durch andere GNSS-Betreiber wie Russland, China oder Europa, aber auch durch internationale oder europäische wissenschaftliche Kooperationen festgelegt worden sind, wie z. B. das in der Geodäsie gebräuchliche *International Terrestrial Reference System* (ITRS) bzw. seine aktuelle Realisierung, der *International Terrestrial Reference Frame 2014* (ITRF2014) [Kaplan & Hegarty, 2017], [Bauer, 2018].

In Österreich bzw. Europa wird das *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89) mit seiner Realisierung, dem *European Terrestrial Reference Frame 1989* (ETRF) verwendet. Das ETRS89 ist ein ECEF-System, welches das Bezugsellipsoid des *geodätischen Referenzsystems 1980* (GRS80) verwendet und dem ITRS zur Epoche 1989 gleicht. Um Koordinatenänderungen aufgrund der Plattentektonik zu vermeiden, wurde der ETRF89 jedoch auf der weitgehend stabilen eurasischen Kontinentalplatte fixiert. Folglich driftet der ITRF seit seiner Festlegung in Bezug auf den ETRF rund 2.5 cm/Jahr nach Nordost [EUREF, 2018].

Vielfach sind auch länderspezifische und länderübergreifende, sogenannte lokale Systeme, in Verwendung. Entscheidend ist die Kenntnis, in welchem Bezugssystem gearbeitet wird bzw. in welchem System sich die Bezugspunkte befinden. Unter Verwendung bekannter oder errechneter Parameter kann (mit verminderter Genauigkeit) zwischen den einzelnen Systemen transformiert werden.

## UTM-Projektion

Um die dreidimensionalen Systeme in die Ebene abzubilden, ist ein mathematisches Modell (Projektion) notwendig. Dazu werden die geographischen Koordinaten (Länge und Breite) in ein zweidimensionales kartesisches Koordinatensystem umgewandelt. In dieser Arbeit wird die konforme, globale *Universale Transversale Mercator Projektion* (UTM-Projektion) verwendet. Die Projektion bezieht sich auf das GRS80-Ellipsoid und kann dadurch unmittelbar mit ETRF89 oder dem aktuellen ITRF in Verbindung gebracht werden. Im UTM-System werden Meridianstreifen (Zonen) in einer Ausdehnung von  $\lambda = 6^\circ$  auf einen Zylinder abgebildet. Jede (Zone) wird durch Breitenkreise in Abständen von  $\varphi = 8^\circ$  unterteilt. Diese werden von Süden nach Norden mit den Buchstaben C bis X (ohne I und O) bezeichnet. Daraus ergeben sich Bereiche von  $6^\circ \times 8^\circ$ , welche Zonenfelder genannt werden. Die Koordinaten werden mit Rechtswert (East) und Hochwert (North) angegeben. Den Bezugspunkt stellen der jeweilige Mittelmeridian und der Äquator dar. Um negative Rechtswerte zu vermeiden, wird dem Mittelmeridian eine Konstante von 500 000 Meter zugefügt. Analog wird dem Hochwert auf der Südhalbkugel ein Wert von 10 000 000 Meter addiert. Die Angabe der Zonenfelder ist obligatorisch, da sonst Mehrdeutigkeiten entstehen würden [BEV, 2019].

### 2.2.3 Satellitenumlaufbahnen

Der Nutzer benötigt genaue Informationen über die Positionen der Satelliten, um seine Position zu bestimmen. Wäre die Erde kugelförmig mit homogener Dichtverteilung, würde sich die Gravitation der Erde so verhalten, als wäre die Erde eine Punktmasse. Diese einfache Annahme und Newtons zweites Gesetz (Aktionsprinzip) gleichgesetzt mit dem Newton'schen Gravitationsgesetz ergibt die Kepler'sche Satellitenbewegung (2.5). Ihre Berechnung wird auch *Zwei-Körper-Problem* genannt, da sich bloß zwei Körper in Wechselwirkung befinden.

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\frac{GM}{r^3} \vec{r} \quad (2.5)$$

Hierbei ist  $M$  die Masse des Zentralkörpers,  $G$  die universelle Gravitationskonstante und  $r$  der Positionsvektor im ECI-System. Die Vorgabe von Anfangsbedingungen, wie Ort und Geschwindigkeit bzw. 6 Keplerbahnelemente (siehe Tabelle 2.3 und

Abbildung 2.9), gemeinsam mit den Satellitenbewegungsgleichungen, beschreibt den Orbit eines Satelliten in einem ungestörten Gravitationsfeld.

<b>Form der Bahn</b>	große Halbachse $a$ Numerische Exzentrizität $e$
<b>Lage der Bahn</b>	Inklination $i$ Rektaszension des aufsteigenden Knotens $\Omega$ Argument des Perigäums $\omega$
<b>Zeitbezug</b>	Zeitpunkt des Perigäums-Durchgang, z. B. die wahre Anomalie $v$

Tabelle 2.3: Keplerelemente [Kaplan & Hegarty, 2017]

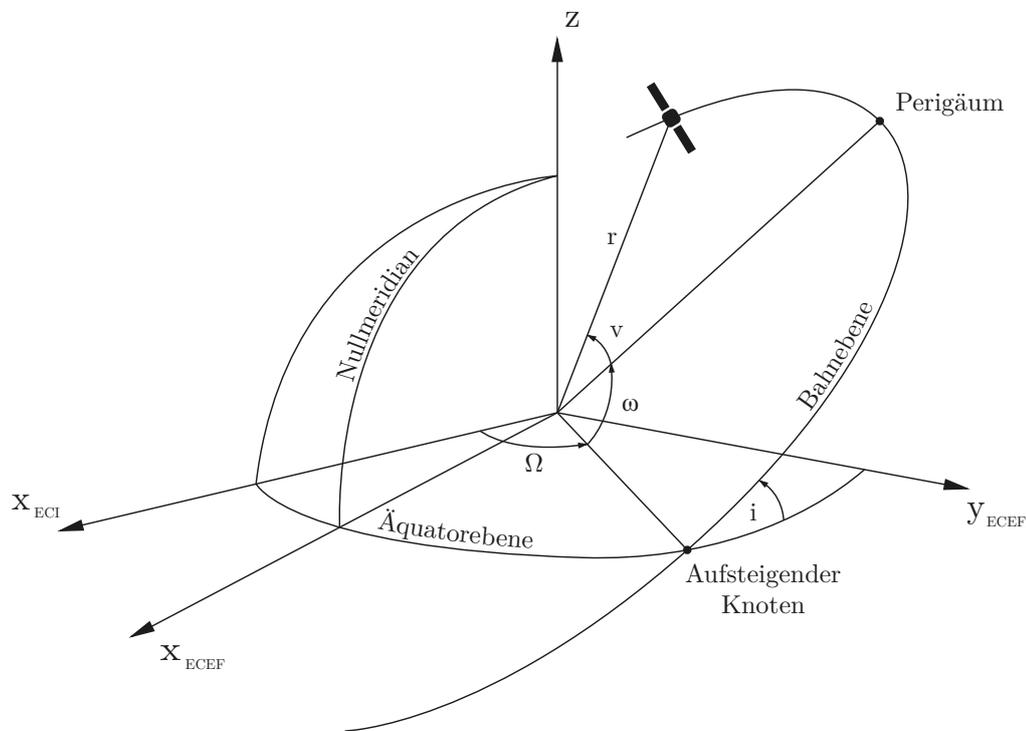


Abbildung 2.9: Keplerelemente

Die Position  $r(t)$  lässt sich anschreiben als

$$r(t) = f(a, \epsilon, i, \Omega, \omega, \tau, t) \quad (2.6)$$

Ausgehend von einem Anfangszustand (Positionsvektor des Satelliten  $r$  und seinem Geschwindigkeitsvektor  $v$  zu einer Bezugszeit  $t_0$ , somit  $r(t_0) = r_0, v(t_0) = v_0$ ) können Ort und Geschwindigkeit zu jedem Zeitpunkt bestimmt werden, indem das System von Integralgleichungen numerisch gelöst wird. Verwirft man diese vereinfachte An-

nahme der Keplerbewegung (2.5) und bedient sich der Gradientenschreibweise sowie des wahren Gravitationspotentials  $V$ , kann (2.5) umgeschrieben werden in

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \nabla V \quad (2.7)$$

Dabei ist  $\nabla$  der Nabla-Operator. Er ist ein vektorieller Differentialoperator, dessen Komponenten die partiellen Ableitungsoperatoren sind. Das Gravitationspotential  $V$  wird durch eine sphärische harmonische Reihe modelliert.

$$V = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=0}^l \left(\frac{a}{r}\right)^l P_{lm}(\sin \theta)(C_{lm} \cos m\lambda + S_{lm} \sin m\lambda) \right] \quad (2.8)$$

In dieser Darstellung (2.8) wird das Gravitationspotential an einem Punkt  $P$  bezüglich der sphärischen Koordinaten des Punktes  $P(r, \theta, \lambda)$  entwickelt. Hierfür wird benötigt:

$GM$	geozentrische Gravitationskonstante
$r$	Entfernung von $P$ zum Ursprung (Geozentrum)
$\theta$	geozentrische Breite von $P$
$\lambda$	Länge von $P$
$a$	mittlerer äquatorialer Radius der Erde
$P_{lm}$	zugehörige Legendre-Funktion
$C_{lm}$	sphärischer harmonischer Kosinus-Koeffizient; Grad $l$ und Ordnung $m$
$S_{lm}$	sphärischer harmonischer Sinus-Koeffizient; Grad $l$ und Ordnung $m$

Auf einen Satelliten wirken nicht nur die Gravitation der Erde, sondern weitere gravitative Kräfte primär durch Mond und Sonne. Es entsteht ein Mehr-Körper-Problem. Weitere zu berücksichtigende Kräfte bzw. Störbeschleunigungen sind der Sonnenstrahlungsdruck, die Reibung durch Atmosphäre und die Gezeiten. Werden diese Störbeschleunigungen mit  $a_d$  zusammengefasst, kann die Bewegungsgleichung (2.7) umgeschrieben werden in

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = \nabla V + a_d \quad (2.9)$$

Nur die Zweikörperbewegungsgleichung (2.5) besitzt eine analytische Lösung und selbst diese kann nicht vollständig in geschlossener Form angegeben werden. Die Bewegungsgleichung der vollständig gestörten Bahn (2.9) besitzt keine analytische

Lösung, ist allerdings numerisch mit beliebiger Genauigkeit lösbar. Die sechs Bahnelemente sind jedoch nicht mehr konstant (oskulierende Bahnelemente), sondern, wegen der störenden Beschleunigungen, zeitabhängig.

$$r(t) = f(a(t), \epsilon(t), i(t), \Omega(t), \omega(t), \tau(t), t) \quad (2.10)$$

Vom Satelliten übertragene Bahndaten umfassen die oskulierenden Orbitalelemente sowie eine Referenzzeit (= Ephemeriden). Nur zu dieser Zeit entsprechen die Orbitalelemente der oskulierenden Bahn. Da die Ephemeridendaten sehr genaue Informationen über die Position und Geschwindigkeit des Satelliten liefern sollten, reicht es nicht aus, nur die oskulierenden Kepler-Orbitalelemente zur Berechnung der Position eines GPS-Satelliten zu verwenden. Eine Lösung wäre, die Ephemeridendaten sehr häufig zu aktualisieren. Eine andere Lösung wäre, dass der GPS-Empfänger die vollständig gestörte Bewegungsgleichung (2.9) integriert. Beide Lösungen sind sehr rechenintensiv und für Echtzeitanwendungen nicht geeignet. Daher werden die oskulierenden Bahnelemente in den Ephemeridendaten durch Korrekturen erweitert, die es dem Benutzer erlauben, die Bahnelemente zwischen Aktualisierungen der Ephemeridendaten des Satelliten zu schätzen [Kaplan & Hegarty, 2017].

### 2.2.4 GNSS – Systemkomponenten

GNSS-Systembetreiber überwachen mit Hilfe des Kontrollsegments die Funktionsfähigkeit des Satelliten-Raumsegments.

#### Raumsegment

Die Hauptfunktionen des Raumsegments (siehe Abbildung 2.10) bestehen darin, Signale zu senden und die vom Kontrollsegment erhaltenen Navigationsnachrichten zu übertragen. Durch eine spezielle Satellitenkonstellation und -anzahl wird sichergestellt, dass die Nutzer, unter Beachtung eines definierten Cut-off Winkels, jederzeit von mindestens 4 Satelliten Signale empfangen können. Im Folgenden wird wieder das amerikanische GPS betrachtet.

Die nominelle Satellitenkonstellation besteht aus 24 Satelliten, die gleichmäßig in sechs orbitalen Ebenen mit einer Inklination von 55 Grad verteilt sind. Zusätzlich

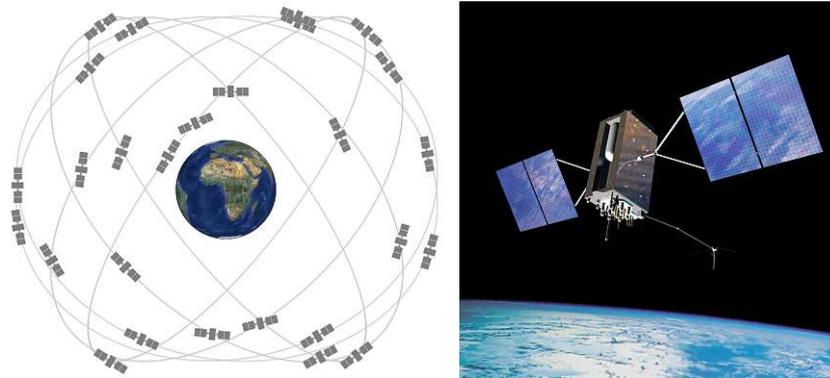


Abbildung 2.10: links: GPS Satellitenkonstellation  
rechts: neuestes GPS Satellitenmodell GPS-III (erster Start 2018) [GPS.gov, 2019]

verfügt die Konstellation über mehrere Backup-Satelliten. Die Umlaufbahnen sind nahezu kreisförmig. Die große Hauptachse hat eine Länge von ca. 26560 km. Die Satelliten befinden sich dementsprechend in einer Höhe von rund 20200 km. Die Höhe und die damit verbundene Geschwindigkeit von 3.9 km/h wurde so gewählt, dass sich eine Umlaufperiode von 12 Stunden *Sternzeit* (11 h 58 m 2 s) ergibt, womit sich die Satellitengeometrie für einen erdgebundenen Beobachter an jedem siderischen Tag wiederholt. Das Weltraumsegment unterliegt ständiger Wartung und Weiterentwicklung.

### Kontrollsegment

Das Kontrollsegment (siehe Abbildung 2.11) ist für den ordnungsgemäßen Betrieb des Systems verantwortlich. Es besteht aus einem Netzwerk von Überwachungsstationen (engl. Monitor Stations, MS), einer Master-Kontrollstation (engl. Master Control Station, MCS), einer Sicherung der MCS und den Bodenantennen (engl. Ground Antennas, GA). Die Überwachungsstationen sind global verteilt und mit Atomuhrenstandards sowie GPS-Empfängern ausgestattet, um fortlaufend GPS-Daten von allen Satelliten sowie atmosphärische Daten von ihren Standorten aus zu sammeln. Die gesammelten Daten werden an die Hauptkontrollstation in Colorado Springs, USA, gesendet, wo sie verarbeitet werden, um unter anderem Ephemeriden und Uhrkorrekturen zu schätzen und die Navigationsnachricht zu generieren. Diese wird über die Bodenantennen auf die Satelliten übertragen, die in vier Überwachungsstationen untergebracht sind [GPS.gov, 2019], [Kaplan & Hegarty, 2017].

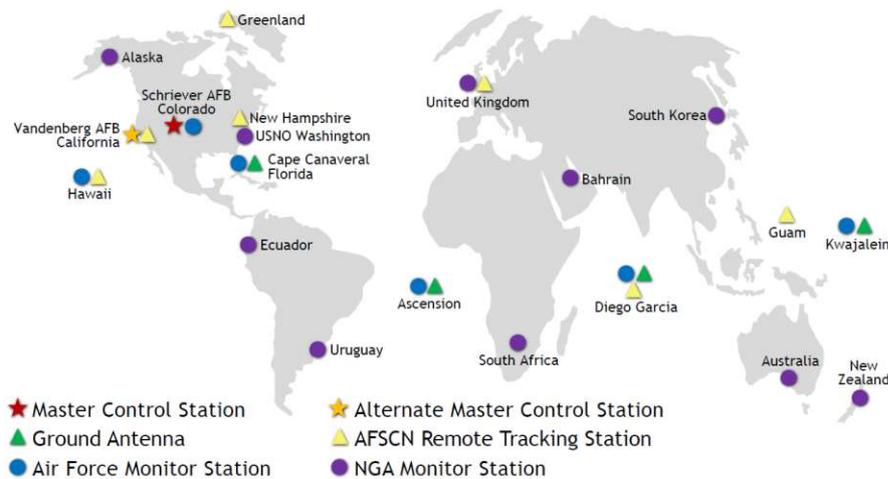


Abbildung 2.11: GPS Kontrollsegment; [GPS.gov, 2019]

### 2.2.5 Zeitsysteme

Zeitsysteme können pauschal in zwei Gruppen unterteilt werden:

- i Erdrotationsgebundene Zeitsysteme
- ii Erdrotationsfreie Zeitsysteme

Zeitsysteme, welche aus der charakteristischen Frequenz von Strahlungsübergängen der Elektronen freier Atome abgeleitet werden (Atomuhren)

Zur erstgenannten Gruppe gehören die *Universal Time* (UT) sowie die in Kapitel 2.2.4 erwähnte Sternzeit. Die UT folgt aus der *wahren Sonnenzeit*, welche als das natürlichste Maß der Zeit gilt. Die wahre Sonnenzeit wird als die Dauer von einem Durchgang der Sonne durch einen Meridian bis zum folgenden Durchgang definiert. Ihr großer Nachteil ist die Unregelmäßigkeit im Laufe eines Jahres. Sie ergibt sich aus der nicht-kreisförmigen Erdbahn bzw. aus dem 2. Kepler'schen Gesetz, welches die Abhängigkeit der Geschwindigkeit eines Planeten und dessen Position auf einer ellipsoidischen Bahn erklärt. Ein weiterer Einfluss entsteht durch die Neigung der Erdachse gegen die Ekliptik. Um diese Unregelmäßigkeit auszugleichen, wird eine *mittlere Sonnenzeit* eingeführt. Sie folgt unter Annahme einer gleichmäßig um die Sonne laufenden, gleichmäßig rotierenden Erde. Wird als Bezugsmeridian der Nullmeridian gewählt, erhält man die UT. Die UT ist somit die mittlere Sonnenzeit bezogen auf den Nullmeridian.

Wird als Bezugspunkt nicht die Sonne, sondern der Sternenhimmel gewählt, resultiert daraus die Sternzeit. Als Bezugspunkt wird der Schnittpunkt der Äquatorebene und der Ekliptik gewählt (= Frühlingspunkt). Die Sternzeit erfasst somit die Rotati-

on der Erde und unterliegt daher allen kurz- und langfristigen Ungleichmäßigkeiten der Erdrotation. Sie ist damit kein gleichförmig verlaufendes Zeitmaß. Aufgrund des Anteils der Umlaufbewegung der Erde um die Sonne ist der mittlere Sterntag um rund  $1/365$  kürzer als ein mittlerer Sonnentag [Bauer, 2018], [IERS, 2018].

Eben genannte Zeitsysteme sind wegen der schwankenden Erdrotation für viele wissenschaftliche Zwecke ungeeignet. Hierfür wurde die gleichmäßige Atomzeit *Temps Atomique International* (TAI) eingeführt. Sie ist eine einheitliche Zeitskala, basierend auf der atomaren Sekunde<sup>3</sup>, welche als die fundamentale Zeiteinheit im Internationalen Einheitensystem definiert ist. Die TAI leitet sich aus einem Ensemble von Atomuhren ab. Sie ist nicht von der Erdrotation beeinflusst, weswegen TAI und UT auseinander driften und sich dieser Drift zu einem zeitlichen Versatz akkumuliert. Dieser liegt derzeit in der Größenordnung von bis zu einigen Millisekunden pro Tag und kann sich in einem Jahr auf eine Sekunde ansammeln. Aus diesem Grund wurde die *koordinierte Weltzeit* (Universal Time Coordinated, UTC) definiert. Sie ist ebenfalls ein gleichmäßiges Zeitsystem, wird aber mit der UT und somit mit dem Sonnenverlauf synchron gehalten. Dies geschieht durch die systematische Einführung einer Schaltsekunde, sobald die Differenz  $dUT = |UT - UTC|$  auf 0.9 Sekunden anwächst. Dies führt dazu, dass die Differenz zwischen TAI und UTC im Laufe der Zeit in ganzzahligen Sprüngen von einer Sekunde variiert. Aktuell (16. Dezember 2019) beträgt der Unterschied TAI – UTC 37 Sekunden. Generiert wird die UTC vom Internationalen Büro für Maß und Gewicht (franz. Bureau International des Poids et Mesures, BIPM) in Paris. Die Schaltsekunden werden vom Internationalen Dienst für Erdrotation und Referenzsysteme (engl. International Earth Rotation and Reference System Service, IERS) bestimmt [IERS, 2018], [Teunissen & Montenbruck, 2017].

GNSS-Systeme sind stark darauf angewiesen, die Ankunftszeit der Signale hochgenau zu messen. Somit unterhält jedes GNSS-System seine eigene Zeitreferenz, um alle Elemente sowie Anwendungen zu synchronisieren. Exemplarisch wird die für das GPS verwendete Zeit, die GPST, näher betrachtet. Die GPST ist eine kontinuierliche Zeitskala, die auf der Grundlage von Atomuhren an den Überwachungsstationen und an Bord der Satelliten definiert wird. Sie begann um 0:00 UTC am 6. Januar 1980. Damals war sie ident mit der UTC, welche zu diesem Zeitpunkt eine Differenz zur TAI von 19 Sekunden aufwies. Es gilt somit:  $GPST = TAI - 19$  Sekunden [Kaplan & Hegarty, 2017].

<sup>3</sup>in Anlehnung an den 86400 Teil des mittleren Sonnentages

### 2.2.6 Signal

Die Signale der GNSS-Satelliten sind elektromagnetische Wellen und können mathematisch als zeit- und ortsabhängige harmonische Wellen  $y$  formuliert werden.

$$y = y_0 \cdot \sin \left[ 2\pi \left( ft - f \frac{r}{v} + \phi_0 \right) \right] \quad (2.11)$$

$y$	Größe und Richtung des elektromagnetischen Feldes
$y_0$	Amplitude
$f$	Frequenz
$t$	Zeit
$r$	Entfernung zwischen Sender und Empfänger
$v$	Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle
$\phi_0$	Phase zum Zeitpunkt $t=0$

Die Geschwindigkeit hängt vom Brechungsindex  $n = c/v$  ab. Im Vakuum gilt  $n = 1$ , wodurch die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle  $v$  gleich der Lichtgeschwindigkeit  $c$  wird.

Die Signale der GNSS-Satelliten müssen die Atmosphäre durchdringen. Die Durchlässigkeit für elektromagnetische Wellen ist durch diese jedoch sehr eingeschränkt. Nur spezielle Frequenzbereiche sind für Beobachtungen durch die Atmosphäre nutzbar. Diese Bereiche werden atmosphärische Fenster genannt. Die Mikrowellen<sup>4</sup>, eine Untergruppe der Radiowellen, befinden sich in solch einem Fenster, weshalb GNSS-basierte Anwendungen in diesem Frequenzbereich arbeiten. Aktuell decken GNSS einen Bereich von ca. 1148 MHz – 1610 MHz ab. Zur weiteren prinzipiellen Erklärung beschränkt sich die vorliegende Arbeit erneut auf das GPS [Bauer, 2018].

Gesendet wird im L-Band auf den Frequenzen  $L1 = 1575.42$  MHz,  $L2 = 1227.60$  MHz und  $L5 = 1176.45$  MHz. Auf diesen Trägerwellen werden mittels Modulationsverfahren (Multiplikation von Träger- und Informationssignal) verschiedene Binär-Codes und Navigationsdaten (siehe Abbildung 2.12) übertragen. Diese Codes sind sogenannte Pseudo Random Noise-Codes (PRN-Codes). Sie sind scheinbar zufällig (pseudo-zufällig), obwohl sie mittels eines bekannten Prozesses erzeugt wurden, der die Wiederholbarkeit sicherstellt und dem Empfänger bekannt ist. Diese Codes werden sowohl vom Satelliten gesendet, als auch im Empfänger generiert.

<sup>4</sup>Als Mikrowellen werden typischerweise Wellen im Frequenzbereich von 300 MHz bis 3 GHz verstanden. Im Rahmen der technischen Kommunikation spricht man synonym vom Ultra High Frequency-Bereich (UHF-Bereich)

Wird nun ein Code empfangen, wird er mit der im Empfänger erzeugten Code-Folge multipliziert und diese Ergebnisse addiert. Die Codes werden kontinuierlich gegenseitig verschoben bzw. der zeitliche Unterschied variiert, bis die Summe maximal wird. Ist dies der Fall, stimmen sie zeitlich bestmöglich überein. Das Verfahren ist bekannt als Autokorrelation. Der zeitliche Unterschied entspricht der Signallaufzeit, wodurch nun die Entfernung berechnet werden kann.

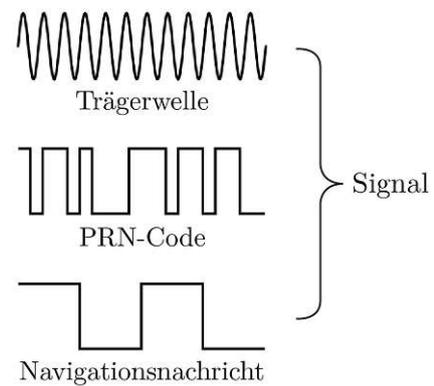


Abbildung 2.12: Signalstruktur

Verwendet werden mehrere verschiedene Codes. Der wichtigste ist der zivile bzw. für alle zugängliche Coarse/Acquisition-Code (C/A-Code). Er besitzt eine Periode von 1023 Bits, welche mit 1.023 MBit/s übertragen wird. Dadurch ergibt sich eine Code-Wiederholung von einer Millisekunde. Sämtliche Satelliten verwenden einen eindeutigen C/A-Code, welcher nur gering mit anderen Codes korreliert. Weitere Codes sind der Precision-Code (P(Y)-Code) und der neuere Military-Code (M-Code). Der P-Code ist  $6.187104 \cdot 10^{12}$  Bits lang. Er wird mit 10.23 MBit/s übertragen, wiederholt sich aufgrund der Länge aber nur alle 266 Tage. Um zu verhindern, dass unbefugte Benutzer das Signal verwenden oder möglicherweise stören, wurde beschlossen, den Code zu verschlüsseln. Zu diesem Zweck wurde er mit einer Verschlüsselungssequenz moduliert, welche als Ergebnis den Y-Code generiert. Der verschlüsselte Code wird als P(Y)-Code bezeichnet und ist bis 2020 gesichert. Als Nachfolger wurde der nun ausschließlich für militärische Zwecke entwickelte M-Code geschaffen. Durch Übertragung mit einer viel höheren Leistung bietet er einen besseren Störwiderstand gegenüber den anderen Codes. Öffentliche Informationen bezüglich des M-Codes sind beschränkt. Er soll Vorteile bezüglich Sicherheit, Exklusivität, Authentifizierung und Vertraulichkeit bieten. Aus Vollständigkeitsgründen werden auch die drei neueren zivilen Signale L2C, L5 und L1C, welche dem GPS-Modernisierungsprogramms entstammen, erwähnt, jedoch nicht weiter behandelt.

Neben den Codes benötigt ein Empfänger detaillierte Informationen über jeden Satelliten. Diese Daten sind als Navigationsdaten zusätzlich mit nur 50 bit/s auf den bestehenden Codes moduliert. Die Navigationsnachricht beinhaltet hochpräzise Ephemeriden, Uhrenkorrekturen und weitere Informationen wie Status der Satelliten, PRN-Nummern, GPS-Systemzeit und den Almanach (grobe Bahndaten aller Satelliten). Zusammenfassend besteht ein Signal aus einer Trägerwelle L1, L2 oder L5, einen oder mehreren Codes und der zusätzlich auf jeder Trägerwelle modulierten Navigationsnachricht [GPS.gov, 2019].

### 2.2.7 Fehler

Damit ein GNSS gewünschte Genauigkeitsanforderungen erfüllt, ist es nötig, Faktoren, welche negativ auf das Messprinzip wirken, zu modellieren bzw. zu minimieren. Beginnend beim Einfluss der Atmosphäre werden die erheblichsten Fehlerquellen dargestellt.

#### Atmosphärische Einflüsse

Im Frequenzbereich der Mikrowellen ist die Atmosphäre zwar durchlässig, hat jedoch viele störende Eigenschaften bezüglich der Signalausbreitung. Da das GNSS-Signal eine elektromagnetische Welle ist, breitet sie sich nach dem Fermat'schen Prinzip (2.12) aus. Es besagt, dass die Welle stets so verläuft, dass die für den Weg  $[P_1P_2]$  benötigte Zeit  $(t_2 - t_1)$  ein Minimum wird.

$$(t_2 - t_1) = \frac{1}{c} \int_{P_1}^{P_2} n ds = \min \quad (2.12)$$

In einem homogenen Medium ist der Brechungsindex überall gleich. Folglich ist der schnellste Weg eine Gerade, welche auch geometrisch die kürzeste Verbindung ist. Der Brechungsindex ist primär abhängig von der Frequenz sowie von der Zusammensetzung des Mediums. Das Medium Atmosphäre ist ein sehr inhomogenes Medium. Der Brechungsindex wird ortsabhängig und der schnellste Weg folgt einer Raumkurve, wobei der geometrisch kürzeste Weg die Gerade bleibt. Um den für GNSS relevanten Einfluss der Atmosphäre zu modellieren, wird sie unterteilt in die *Ionosphäre* und in die darunter liegende *neutrale Atmosphäre* (Abbildung 2.13). Diese umfasst die Troposphäre, die Stratosphäre und die Mesosphäre [Bauer, 2018].

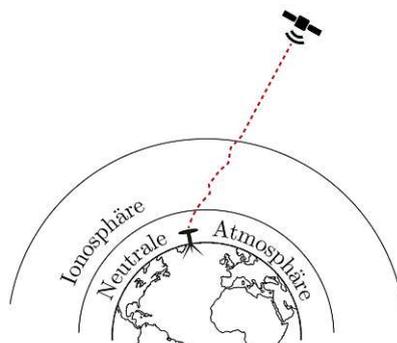


Abbildung 2.13: Signalausbreitung: Vakuum, Ionosphäre und neutrale Atmosphäre

Innerhalb der neutralen Atmosphäre sind Trägerwelle und ihre Signalinformation (Code und Navigationsnachricht) in Bezug auf die Ausbreitung im freien Raum

verzögert. Diese Verzögerung ist eine Funktion des Brechungsindex, der von der lokalen Temperatur, dem Druck und der relativen Luftfeuchtigkeit abhängig ist. Diese sind entlang des Messweges nicht messbar und werden modelliert. Ohne Kompensation kann diese Verzögerung, für eine Station in Meereshöhe, etwa 2.4 m für einen Satelliten im Zenit betragen. Steht der Satellit in einer Elevation von  $5^\circ$ , kann die Verzögerung auf bis zu 25 m anwachsen. Die Modellierung erfolgt durch Aufteilung in einen hydrostatischen Anteil und in einen feuchten, nicht-hydrostatischen Anteil. Grund dieser Gliederung ist, dass die hydrostatische Komponente rund 90 % der Verzögerung in der neutralen Atmosphäre ausmacht und sehr genau durch einfache Modelle bestimmt werden kann. Die feuchte Komponente ist abhängig von der Verteilung des Wasserdampfes und des Partialdrucks und kann nur sehr unsicher bestimmt werden.

Als Ionosphäre ist der Raum zwischen 70 km und 1000 km über der Erdoberfläche definiert. In diesem Bereich ionisieren ultraviolette Strahlen der Sonne einen Teil der Gasmoleküle und setzen Elektronen frei. Diese freien Elektronen beeinflussen die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen, einschließlich der GNSS-Signale. Die Geschwindigkeit der Trägerwelle (Phasengeschwindigkeit) verhält sich hierbei anders als die Geschwindigkeit der Information (Gruppengeschwindigkeit). Konkret wird die Phasengeschwindigkeit beschleunigt, wohingegen die Gruppengeschwindigkeit abnimmt, ein Phänomen, welches als ionosphärische Divergenz bezeichnet wird.

Der Elektronengehalt unterliegt vielen räumlichen und zeitlichen Schwankungen. Werden lokale Störungen vernachlässigt, ist die räumliche Variation im wesentlichen breitenabhängig, mit einem Maximum in der Äquatorregion. Die zeitlichen Variationen besitzen tages- und jahreszeitliche Perioden. Die freien Elektronen führen, im Gegensatz zur neutralen Atmosphäre, zu einer für GNSS-Frequenzen dispersiven<sup>5</sup> Beeinflussung. Dieser Effekt kann zum Vorteil genutzt werden. Durch Messungen mit Zweifrequenzempfängern kann eine Korrektur ermittelt werden bzw. ihr Einfluss eliminiert werden. Für Einfrequenzempfänger sind Modelle der Ionosphäre vorhanden. Ein wichtiges Beispiel ist das Klobuchar-Modell, das im Durchschnitt etwa 50 % der ionosphärischen Verzögerung in mittleren Breiten durch einen Satz von Koeffizienten modelliert, welche in der GPS-Navigationsnachricht enthalten sind. Die Auswirkung auf die Laufzeit beträgt für ein Signal, kommend von einem Satellit, etwa 10 ns (3 m) in der Nacht. Während des Tages kann die Verzögerung auf 50 ns (15 m) steigen und bei niedrigen Elevationen sogar bis zu 150 ns (45 m) erreichen [Kahmen, 2006], [Kaplan & Hegarty, 2017].

<sup>5</sup>Dispersion beschreibt die Ausbreitungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit ihrer Frequenz

### Satellitenuhrfehler

Aufgrund der hohen Signalgeschwindigkeit führt bereits ein Fehler von  $10^{-9}$  Sekunden (1 ns) zu einem Streckenfehler von fast 30 cm. Trotz hochgenauer Atomuhren<sup>6</sup> ist die Ermittlung von Uhrenkorrekturparameter obligat. Die MCS ermittelt und sendet diese an die Satelliten. Die Uhrenkorrekturparameter werden in der Navigationsnachricht übermittelt, welche vom Empfänger mit einem Polynom zweiter Ordnung implementiert werden. Da diese Korrekturen anhand einer vorhergesagten Schätzung der tatsächlichen Satellitenuhrfehler berechnet werden, bleibt ein Restfehler übrig [Kahmen, 2006], [Kaplan & Hegarty, 2017], [GPS.gov, 2019].

### Ephemeridenfehler

Die Ephemeridenfehler werden im Wesentlichen durch den nicht korrekt modellierten Strahlungsdruck der Sonne hervorgerufen. Dieser Einfluss wird überlagert mit Anomalien des Erdschwerefeldes. Die Ephemeriden werden für jeden Satelliten in der MCS berechnet und übertragen. Es bleibt ein Restfehler, welcher im Allgemeinen in radialer Richtung am kleinsten ist [Kaplan & Hegarty, 2017].

### Relativistische Effekte

Die spezielle Relativitätstheorie besagt, dass alle inneren Prozesse eines physikalischen Systems langsamer abzulaufen scheinen, wenn sich dieses System relativ zum Beobachter bewegt. Das bedeutet, dass auch die Satelliten-Uhren, die sich relativ zum Nutzer bewegen, mit einer langsameren Taktrate arbeiten, als die des Nutzers selbst. Dieser Effekt ist umso stärker, je größer die Relativgeschwindigkeit ist.

Aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt, dass Prozesse, welche sich in einem niedrigeren Gravitationspotential befinden, schneller ablaufen. Dies ist gleichbedeutend mit einer höheren Frequenz der Satellitenuhr gegenüber der Empfängeruhr, welche sich in einem höheren Gravitationspotential auf der Erde befindet. Der Einfluss gemäß der Allgemeinen Relativitätstheorie ist dominanter und übersteigt den, der aus der speziellen Relativitätstheorie entspringt. Um dem entgegenzuwirken, wird die Grundfrequenz<sup>7</sup> der Satellitenuhren vor dem Start von 10.23 MHz auf 10.22999999543 MHz reduziert. Auf diese Weise werden die zwei erwähnten Effekte und somit der Großteil der relativistischen Einflüsse entfernt. Der Nutzer muss keine Korrektur anbringen.

<sup>6</sup>moderne GPS-Satelliten beitzen drei Rubidium Atomuhren, Allen-Varianz  $< 10^{-12}$  s

<sup>7</sup>Die erwähnten Frequenzen L1, L2 und L5 entstehen durch Multiplikation mit dieser Grundfrequenz von 10.23 MHz

Ein weiterer relativistischer periodischer Effekt entsteht aufgrund der geringen Exzentrizität der Satellitenbahn. Infolgedessen ändert sich die Geschwindigkeit sowie das Gravitationspotential des Satelliten. Außerdem entsteht durch die Rotation der Erde während der Signalübertragung der sogenannte Sagnac-Effekt. Während der Signalübertragung erfährt die Empfängeruhr auf der Erdoberfläche eine endliche Drehung in Bezug auf ein ECI-System. Je nach Signalrichtung steigt oder sinkt die Laufzeit. Der Fehler ist breitenabhängig und wird an den Polen gleich Null.

Bei einer Messdauer von mehreren Stunden können diese Effekte durchaus auf einen Laufzeitfehler von 10 ns anwachsen. Eine Korrektur kann im Empfänger berücksichtigt werden, ist jedoch durch die in dieser Arbeit verwendeten Methoden (siehe Kapitel 3) irrelevant [Teunissen & Montenbruck, 2017], [Kaplan & Hegarty, 2017].

### Mehrwegempfang

Ein sehr dominanter Fehler wird durch den Mehrwegempfang (engl. Multipath) verursacht. Er entsteht durch den unerwünschten Empfang von reflektierten oder gebeugten Kopien des Signals. Da der von einer Reflexion zurückgelegte Weg immer länger ist als der direkte Weg, entspricht der Fehler einer Laufzeitverzögerung. Solche Mehrwegeeffekte verzerren, speziell bei kurzer Verzögerung, die Korrelationsfunktion zwischen dem empfangenen zusammengesetzten Signal (direkter Weg & reflektierter Weg) und der lokal erzeugten Referenz im Empfänger. Der Fehler hängt von der Größenordnung der Verzögerung und von der Signal-Leistung sowie Phasenlage im Verhältnis des direkten Signales ab.

Der theoretische Maximalwert<sup>8</sup> der Verzögerung im Falle einer Trägerphasenmessung (siehe Kapitel 3.1) ist ein Viertel der Wellenlänge, somit ungefähr 5 cm für die GPS-Frequenz L1 oder L2. Dieser Wert gilt für eine Reflexion, im Allgemeinen sind jedoch mehrere vorhanden. Dadurch kann der Fehler theoretisch über 5 cm betragen. Aus der Praxis kann entnommen werden, dass nicht mehrere Signale gleichzeitig mit identischer Phasenlage und idealer Signalstärke eintreffen, wodurch ein Fehler von < 5 cm zu erwarten ist.

Viele namhafte Hersteller von GNSS-Produkten verwenden Empfänger-interne Techniken zur Mehrwegempfang-Verminderung (engl. Multipath mitigation techniques). Diese Algorithmen basieren meist auf einem erweiterten Korrelationsverfahren wie z. B. dem Double-Delta-Korrelator oder dem Strobe-Korrelator. Zusätzlich werden Korrekturansätze bezüglich dem Signal-Rausch-Verhältnis (engl. signal-to-noise ra-

<sup>8</sup>Die Verzögerung wird maximal, wenn die Phasenverschiebung gegenüber dem direkten Signal 180° beträgt

tio, SNR) bzw. der Änderung des SNR verfolgt und sind Gegenstand der Forschung. Triviale aber effektive Methoden zur Reduktion des Mehrwegeeffektes sind:

- Vermeidung von offensichtlich ungeeigneten Antennenstandorten, z. B. in der Nähe von Gebäuden, Fahrzeugen und Wasserflächen
- Erhöhung des Cut-off Winkels auf mindestens  $15^\circ$
- Verwendung von Choke Ring Antennen  
Choke Ring Antennen bestehen aus einer zentralen Antenne umgeben von einer Reihe konzentrischer metallischer Zylinder, die etwas mehr als eine Viertelwellenlänge tief sind. Dadurch kann vor allem bodennaher Mehrwegempfang reduziert werden [Teunissen & Montenbruck, 2017].

### Weitere Fehler

- GNSS-Messungen beziehen sich auf einen Referenzpunkt in der Antenne, dem sogenannten elektrischen Antennenphasenzentrum. Es ist nicht notwendigerweise das geometrische Zentrum der Antenne und hängt von der Frequenz und der Signalrichtung ab.
- Hardware-Verzögerung: Jedes Signal erfährt eine unterschiedliche Verzögerung von der Signalerzeugung bis zur Ausgabe vom Antennenphasenzentrum. Die Eigenschaft der Hardwareverzögerung tritt ebenfalls im Empfänger auf.
- Fehler in der Entfernungsmessung des Empfängers, verursacht durch Empfängeruhrfehler, thermisches Rauschen, Hardware-Verzögerung und Softwareungenauigkeit
- Störung des Signalempfangs durch natürliche oder künstliche Signale in unmittelbarer Nähe der GNSS-Frequenzen (Jamming) [Kaplan & Hegarty, 2017]

Wird die einfache Gleichung der Pseudostrecke (2.3) durch genannte Fehlereinflüsse erweitert, kann eine finale Beobachtungsgleichung (2.13) wie folgt angeschrieben werden:

$$\begin{aligned} \rho = & r_u^s + (\delta t_u - \delta t^s) \cdot c + (d_u - d^s) \cdot c + \xi_u^s \\ & + \delta r_{u,ion}^s + \delta r_{u,tro}^s + \delta r_{u,rel}^s + e_u^s \end{aligned} \quad (2.13)$$

Durch die nun explizit angeführten Fehlerterme in (2.13) kann die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich der (Vakuum)-Lichtgeschwindigkeit  $c$  gesetzt werden. Die restlichen Größen in (2.13) sind:

$r$	geometrische Distanz	$\delta r_{\text{ion}}$	Ionosphärenverzögerung
$\delta t$	Uhren-Offset	$\delta r_{\text{tro}}$	Troposphärenverzögerung
$d$	instrumentelle Verzögerung	$\delta r_{\text{rel}}$	Verzögerung bezgl. relativ. Effekte
$\xi$	Phasenzentrum-Offset Korrektur	$e$	Mehrwegeeffekte & Empfängerrauschen

## 2.2.8 Fehlerbudget & Positionsfehler

Werden Satellitenuhr- und Ephemeridenfehler, Atmosphärenfehler, Empfängerrauschen und Mehrwegeeffekte in Meter ausgedrückt und kombiniert, kann daraus ein statistischer quantitativer Wert ( $1\sigma$ -Wahrscheinlichkeit), bekannt als *User Equivalent Range Error* ( $\sigma_{\text{UERE}}$ ), für die Pseudostrecke berechnet werden. Der UERE fasst die Einzelfehler  $\Delta_i$  durch Berechnung der Wurzel der Quadratsumme zu einem Gesamtfehler  $\sigma_{\text{UERE}}$  (2.14) zusammen [Teunissen & Montenbruck, 2017].

$$\sigma_{\text{UERE}}^2 = \sum \Delta_i^2 \quad (2.14)$$

Nachstehende Tabelle 2.4 zeigt Schätzungen des repräsentativen UERE-Budgets. Für einen Ein-Frequenz-Empfänger ist die dominante Fehlerquelle die verbleibende ionosphärische Verzögerung. Zwei-Frequenz-Empfänger können, wie erwähnt, diesen Fehler nahezu vollständig beseitigen.

Fehlerquelle	Beitrag $1\sigma$ [m]	
	Ein-Frequenz-Empfänger	Zwei-Frequenz-Empfänger
Satellitenorbit	0.3	0.3
Satellitenuhr	0.4	0.4
Codegruppenverzögerung	0.15	-
Ionosphäre <sup>1</sup>	7.0	0.1
Troposphäre	0.2	0.2
Mehrwegeeffekt	0.2	0.2
Empfängerrauschen	0.1	0.1
UERE	7.03	0.6

Tabelle 2.4: Repräsentative UERE-Werte für Ein- und Zwei-Frequenz-Empfänger  
<sup>1</sup>ohne Anwendung des Klobuchar-Modells; [Kaplan & Hegarty, 2017]

Der durch GPS zu erwartende Positionsfehler  $\Delta_P$  ist letztendlich ein Produkt aus dem  $\sigma_{\text{UERE}}$  und einem Geometriefaktor. Der Geometriefaktor beschreibt den Effekt der relativen Geometrie zwischen Nutzer und den für ihn sichtbaren Satelliten. Er wird allgemein als *Dilution of Precision* (DOP) bezeichnet.

$$\Delta_P = \sigma_{\text{UERE}} \cdot \text{DOP} \quad (2.15)$$

Der DOP-Parameter ist ein Maß für die Güte der geometrischen Konfiguration. Als grafische Veranschaulichung dient die folgende Abbildung 2.14. In der linken Grafik sind die Satelliten nahezu orthogonal zum Nutzer angeordnet, während auf der rechten Seite die Satelliten räumlich enger beieinander liegen und dadurch ein großer Schnittwinkel (schleifender Schnitt) gegeben ist. In beiden Fällen werden der perfekte Schnittpunkt sowie zusätzliche strichlierte Kreise, welche dem Entfernungsfehler entsprechen (analog zu 2.7), dargestellt. Die roten Bereiche zeigen jene Positionen an, die bei Entfernungsmessungen innerhalb der dargestellten Fehlergrenzen entstehen können. Obwohl in beiden Fällen der Entfernungsfehler gleich ist, unterscheidet sich die Genauigkeit des berechneten Ortes sehr. Die Grafik zeigt anschaulich, dass die Geometrie in der rechten Abbildung bei vergleichbaren Messfehlern zu größeren Positionsfehlern bzw. zu höheren DOP-Werten führt [Kaplan & Hegarty, 2017].

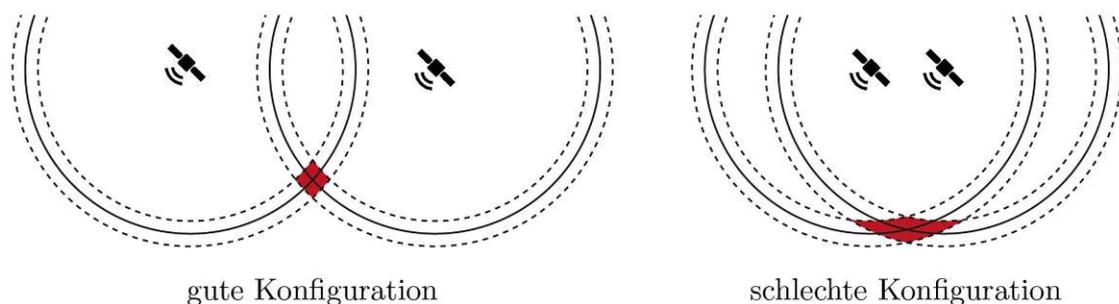


Abbildung 2.14: Dilution of Precision; Güte der geometrischen Konfiguration

Unter <https://www.gps.gov/systems/gps/performance> wird über die Performance des GPS ausführlich informiert. Die US-Regierung hat sich verpflichtet, ein festgelegtes Leistungsniveau bereitzustellen, welches durch zahlreiche Kennzahlen festgelegt ist [GPS.gov, 2019].

### 2.2.9 GPS & Co.

Das amerikanische GPS ist das meistgenutzte und populärste GNSS, weshalb es in der vorliegenden Arbeit zur allgemeinen Erklärung solcher Systeme verwendet wurde. Natürlich gibt es einige weitere GNSS-Betreiber. Das Grundprinzip ist dabei ident, im Detail sind jedoch viele Elemente abweichend. Satellitenbahn und -anzahl, Bodensegment sowie Signal sind nur einige Faktoren, welche im Vergleich mit GPS divergieren. Eine akkurate Beschreibung dieser Faktoren wird in dieser Arbeit nicht behandelt. Vollständigkeitshalber seien die anderen globalen & regionalen Satellitensysteme erwähnt [Teunissen & Montenbruck, 2017]:

- **Galileo**;  
ein bis 2020 operationelles, europäisches globales System
- **GLONASS** (engl. Global Navigation Satellite System);  
voll operationelles globales System, betrieben vom Verteidigungsministerium der Russischen Föderation
- **Beidou**;  
chinesisches Satellitennavigationssystem, die regionale Version des Systems ist in Betrieb, das globale System befindet sich noch im Aufbau
- **IRNSS** (engl. Indian Regional Navigation Satellite System);  
im Aufbau befindliches regionales indisches Satellitennavigationssystem
- **QZSS** (engl. Quasi-Zenith Satellite System);  
im Aufbau befindliches regionales japanisches Satellitennavigationssystem

Abschließend werden noch die *Satellite Based Augmentation Systems* (SBAS) genannt. Sie unterstützen erwähnte Systeme durch zusätzliche Informationen, gesendet von geosynchronen Satelliten. In Betrieb sind derzeit folgende Systeme:

- **EGNOS** (engl. European Geostationary Navigation Overlay Service);  
Signalverfügbarkeit: Europa, Nordafrika und Naher Osten
- **WAAS** (engl. Wide Area Augmentation System);  
Signalverfügbarkeit: USA
- **MSAS** (engl. Multi-functional Satellite Augmentation System);  
Signalverfügbarkeit: Japan
- **GAGAN** (engl. GPS Aided Geo Augmented Navigation);  
Signalverfügbarkeit: Indien

## 3 Präzise GNSS Methoden

Wie in Kapitel 2 erläutert, kombiniert sich der Positionierungsfehler aus den Fehlern bezüglich der Pseudostrecke und der Satellitenkonstellation. Der größte Fehleranteil wird durch die ungenügende Ionosphärenkenntnis generiert. Er kann durch Zweifrequenzmessung jedoch fast zur Gänze reduziert werden. Im Folgenden werden Techniken und Methoden vorgestellt, welche den Positionierungsfehler signifikant senken können.

### 3.1 RTK – Real Time Kinematik

Bislang wurde die GNSS-basierte Positionierung als Messung mit einem Empfänger zu mehreren Satelliten betrachtet. Dies wird als Methode der Einzelpunktbestimmung (engl. Single Point Positioning, SPP) verstanden. Für viele Anwendungen, insbesondere für diese Arbeit, wird ein weit höheres Maß an Genauigkeit benötigt. Dafür eignen sich sogenannte *differentielle GNSS-Methoden* (engl. Differential GNSS, DGNSS).

Das Prinzip von DGNSS (siehe Abbildung 3.1) profitiert von der engen räumlichen und zeitlichen Korrelation von vielen der in Kapitel 2.2.7 besprochenen Fehlerquellen. DGNSS ist eine relative Beobachtungstechnik, welche mindestens 2 GNSS Empfänger voraussetzt. Ein Empfänger ist dabei ortsfest und wird als Referenzstation oder Basis verstanden. Der zweite Empfänger ist der gesuchte, zu positionierende Empfänger, genannt Rover. Ist der Fehlereinfluss für die Referenzstation bekannt, kann diese Information in Form von Korrekturdaten durch ein geeignetes Kommunikationsverfahren an den benachbarten Rover weitergegeben werden. Dieser kann nun seine Position durch die korrigierten Beobachtungen berechnen. Es kann erwartet werden, dass die Positionsgenauigkeit des Rovers dadurch verbessert wird. Maßgebliche Voraussetzung ist die Kenntnis der präzisen Position der Referenzstation (diesbezügliche Diskussion folgt in Kapitel 4.1). Da die Korrelation von GNSS-Fehlern bei kürzeren Basislinien<sup>1</sup> im Allgemeinen höher ist, nimmt die Genauigkeit mit wachsender Basislinienlänge ab.

<sup>1</sup>Vektor zwischen Rover und Referenzstation

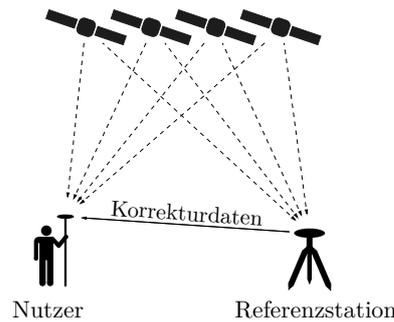


Abbildung 3.1: DGNSS Prinzip; in Anlehnung an [Kaplan & Hegarty, 2017]

Während durch DGNSS innerhalb kurzer Basislinien (wenige km) Orbit- und ionosphärische Fehler drastisch reduziert werden, fallen die Satellitenuhrfehler vollständig aus der Beobachtungsgleichung (2.13). Auch troposphärische Fehler werden dezimiert, wenngleich geringer. Insbesondere bei erheblichen Höhenunterschieden zwischen Referenzstation und Rover.

Der Mehrwegeempfang sowie der Empfängerfehler sind zur Referenz unkorreliert und somit durch DGNSS nicht betroffen. Wenn die Referenzstation starken Mehrwegeeffekten unterliegt, kann DGNSS unter Umständen sogar kontraproduktiv sein. Richtwerte für den Genauigkeitsgewinn zeigt Tabelle 3.1. Sie vergleicht das  $1\sigma$  Fehler-Budget mit (siehe Tabelle 2.4, Kapitel 2.2.8) und ohne (lokalen) DGNSS-Korrekturen.

Fehlerquelle	Beitrag $1\sigma$ [m]	
	Ein-Frequenz-Empfänger (SPP)	mit DGNSS-Korrekturen
Satellitenorbit	0.3	0.1–0.6 mm/km
Satellitenuhr	0.4	0.0
Codegruppenverzögerung	0.15	-
Ionosphäre <sup>1</sup>	7.0	0.2–4.0 cm/km
Troposphäre	0.2	1.0–4.0 cm/km
Mehrwegeeffekt	0.2	0.3
Empfängerrauschen	0.1	0.1
UERE	7.03	0.3 m + 1–6 cm/km

Tabelle 3.1:  $1\sigma$  Fehlerniveau der SPP Lösung und der (lokalen) Code-basierten DGNSS Lösung  
<sup>1</sup>ohne Anwendung des Klobuchar-Modells; [Kaplan & Hegarty, 2017]

DGNSS liefert eine beachtliche Genauigkeitssteigerung (Dezimeter-Bereich), ist im Sinne dieser Arbeit jedoch weiterhin zu unpräzise. Um Genauigkeiten im Zentimeter-Bereich bzw. Subzentimeter-Bereich zu erreichen, muss ein anderes Element des Signals, die Trägerwelle, ausgewertet werden. Hierbei kann anhand der Wellenlänge

$\lambda$ , der Anzahl der Wellen  $N$  sowie der Beobachtungsgröße, dem Phasenreststück  $\Delta\phi$ , auf die Pseudostrecke  $\rho$  geschlossen (3.1) werden.

$$\rho(t_0) = \phi(t_0) + \lambda N(t_0) \quad (3.1)$$

Analog zur Beobachtungsgleichung für Code-Messungen (2.13) lässt sich die Beobachtungsgleichung für Trägerphasenmessungen wie folgt darstellen:

$$\begin{aligned} \theta = & r_u^s + (\delta t_u - \delta t^s) \cdot c + (\kappa_u - \kappa^s) \cdot c + \zeta_u^s \\ & - \delta r_{u,ion}^s + \delta r_{u,tro}^s + \delta r_{u,rel}^s + \epsilon_u^s + \lambda \cdot N \end{aligned} \quad (3.2)$$

r	geometrische Distanz	$\delta r_{tro}$	Troposphärenverzögerung
$\delta t$	Uhren-Offset	$\delta r_{rel}$	Verzögerung bezgl. relativ. Effekte
$\kappa$	instrumentelle Verzögerung	$\epsilon$	Mehrwegeffekte & Empfängerrauschen
$\zeta$	Phasenzentrum-Offset Korrektur	$\lambda$	Wellenlänge
$\delta r_{ion}$	Ionosphärenverzögerung	N	Mehrdeutigkeiten

Es wird angemerkt, dass für die instrumentelle Verzögerung, die Phasenzentrum-Offset-Korrektur sowie für den Mehrwegeffekt/Empfängerrauschen-Term eine andere Symbolik gewählt wurde, da die Größenordnung zur Code-Beobachtungsgleichung (2.13) differiert.

Zur Bestimmung von  $\Delta\phi$  wird die Differenz der empfangenen Trägerschwingung und der im Empfänger generierten Referenzschwingung gebildet. Dadurch kann die Verschiebung bzw.  $\Delta\phi$  innerhalb einer Welle präzise und eindeutig bestimmt werden. Die ganzzahligen Wellen  $N(t_0)$  bleiben vorerst unbekannt und werden Mehrdeutigkeiten (engl. ambiguities) genannt. Durch die kontinuierliche Relativbewegung bzw. die Abstandsänderung zwischen Satellit und Empfänger ändert sich zu jedem Zeitpunkt  $t_i$  die Anzahl von  $N$ . Ausgehend von der ersten Synchronisation kann ein Integrator im Empfänger die Phasenänderungen addieren. Folglich kann die Anzahl der ganzen Wellenlängen  $N(t_0, t_i)$  während der Beobachtungszeit  $(t_0, t_i)$  bestimmt werden, wodurch die initialen Mehrdeutigkeiten konstant bleiben (Abbildung 3.2). Die Gleichung der Phasen-Pseudostrecke (3.1) kann angeschrieben werden als

$$\rho(t_i) = \Delta\phi(t_i) + \lambda N(t_0, t_i) + \lambda N(t_0) \quad (3.3)$$

Der kritische Teil der Trägerphasenauswertung liegt in der Lösung der Mehrdeutigkeitszahl  $N(t_0)$  zum Zeitpunkt  $t_0$ . Deren Bestimmung ist seit Beginn der GNSS-Forschung stetigen Änderungen und Optimierungen unterworfen und weiterhin Ge-

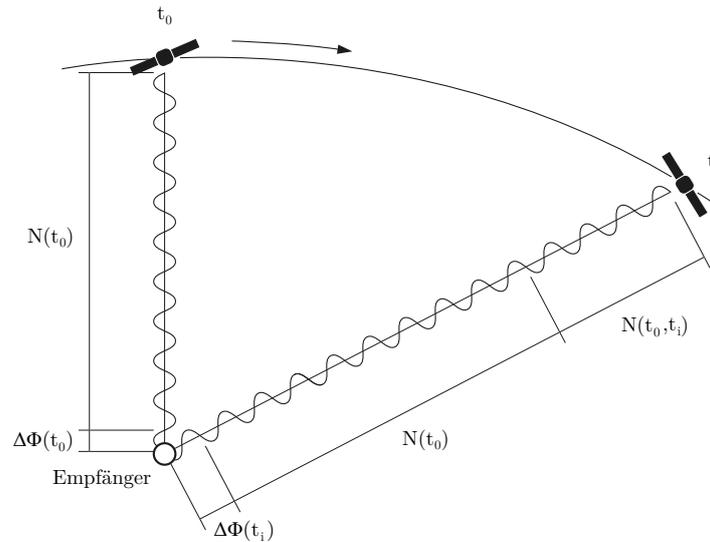


Abbildung 3.2: Prinzip der Phasemessung

genstand der Forschung. Es wurden viele komplexe Algorithmen entwickelt, um aus möglichst wenig Messungen eine dementsprechend schnelle Lösung (Initialisierung) zu finden. Diese Lösung kann durch Signalabrisse und durch die in Kapitel 2.2.7 erwähnten Fehler, insbesondere bei langen Basislinien, erschwert werden oder sogar fehlerhaft sein. Es ist nötig, diese Fehler durch Relativmessungen zu beseitigen. Dies erfolgt durch möglichst linear-unabhängige (Mehrfach-) Differenzbildungen der Signale.

An dieser Stelle sei eine weitere Fehlerquelle, der Phasensprung (engl. cycle slip), erwähnt. Der Fehler wird hauptsächlich durch einen kurzzeitigen Signalverlust verursacht und führt zu einem ganzzahligen Sprung in den Mehrdeutigkeiten. Bleibt eine Beziehung zu mindestens vier Satelliten bestehen, lassen sich die Sprünge detektieren und beseitigen. Im ungünstigsten Fall ist eine Neuinitialisierung, d.h. die Mehrdeutigkeiten müssen erneut festgelegt werden, notwendig. Detaillierter wird die Problematik der Mehrdeutigkeiten-Lösung in dieser Arbeit nicht angeführt. Das Thema ist umfangreich und aktueller Forschungsgegenstand. Für ein grundlegendes Verständnis kann auf Teunissen & Montenbruck [2017, Kapitel 23] zugegriffen werden. Der Auszug soll jedoch die Schwierigkeit einer schnellen und zuverlässigen Initialisierung aufzeigen.

Wird DGNSS mit der Phasemessung kombiniert, kann die Referenzstation benötigte Daten zur Mehrdeutigkeiten-Lösung an den Rover senden. Dem Nutzer ist es dadurch möglich, die Mehrdeutigkeiten in nahezu Echtzeit bzw. kinematisch zu bestimmen. Dieses Verfahren liefert cm-Genauigkeit und ist bekannt unter *Real Time Kinematic* (RTK) [Kaplan & Hegarty, 2017].

## 3.2 RTK – Referenznetzkonzepte

Die Genauigkeit einer differentiellen Messmethode wie RTK ist wesentlich von der Basislinienlänge abhängig. Wird nur mit einer benutzereigenen Referenzstation gearbeitet, liegt der Anwendungsbereich innerhalb weniger Kilometer rund um die Station, wodurch die Methode räumlich sehr beschränkt ist. Um flächendeckend hohe Genauigkeiten zu erzielen, liegt die Lösung nahe, eine sehr hohe Dichte von Referenzstationen zu generieren. Eine andere Möglichkeit ist die Verbesserung der Korrekturmodelle. Dies gelingt durch eine Vernetzung der Referenzstationen zu einem sogenannten *Referenznetz*. Für den Rover kann damit ein Fehlermodell (Modell für Bahn-, Uhr-, Ionosphären- und Troposphärenstreckenfehler) für seine Position aus den ihn umgebenden Referenzstationen interpoliert werden. Die Distanz zur nächstgelegenen Station kann dadurch auf 50–100 km erhöht werden.

Permanente großräumige regionale und landesweite Referenznetze werden von verschiedenen privaten und öffentlichen Betreibern kostenpflichtig zur Verfügung gestellt. In Österreich kann mit *Austrian Positioning Service* (BEV) und *Echtzeit Positionierung Austria* (EPOSA) auf zwei landesweite Satelliten-Positionierungsdienste zugegriffen werden, welche im Folgenden kurz erläutert werden [Bauer, 2018].

### 3.2.1 APOS

APOS ist der Positionierungsdienst des *Bundesamtes für Eich- und Vermessungswesen* (BEV). Das Netz (Abbildung 3.3) besteht aktuell aus 36 permanenten Referenzstationen, welche die Signale von GPS, GLONASS und Galileo empfangen. Davon werden 35 Stationen direkt vom BEV und eine Station von der *Leopold-Franzens-Universität in Innsbruck* (LFUI) betrieben. Bis Ende September 2018 unterstützte zusätzlich die *Kärntner Elektrizitäts-Aktiengesellschaft* (KELAG) das Netz mit 8 Stationen [BEV, 2018]. Seit Anfang 2009 konnte eine länderübergreifende Vernetzung mit allen benachbarten Vermessungsverwaltungen realisiert werden. Dadurch wird eine erhöhte Systemverfügbarkeit mit gesteigerter Performance bis an die Staatsgrenzen gewährleistet.

Die Referenzstationen von APOS bilden in Österreich die höchste Hierarchiestufe der Realisierung des ETRS89. Somit sind Stationskoordinaten und damit auch die mit RTK erzielten Ergebnisse auf das ETRS89 bezogen. Auf Basis eines interpolierten Gitternetzes (Maschenweite  $30'' \times 45''$ ), abgeleitet aus ca. 28000 Identpunkten des Festpunktfeldes 1.–5. Ordnung, welches für ganz Österreich die Inhomogenitäten zwischen dem ETRS89 und dem österreichischen Landessystem beschreibt, kann auch

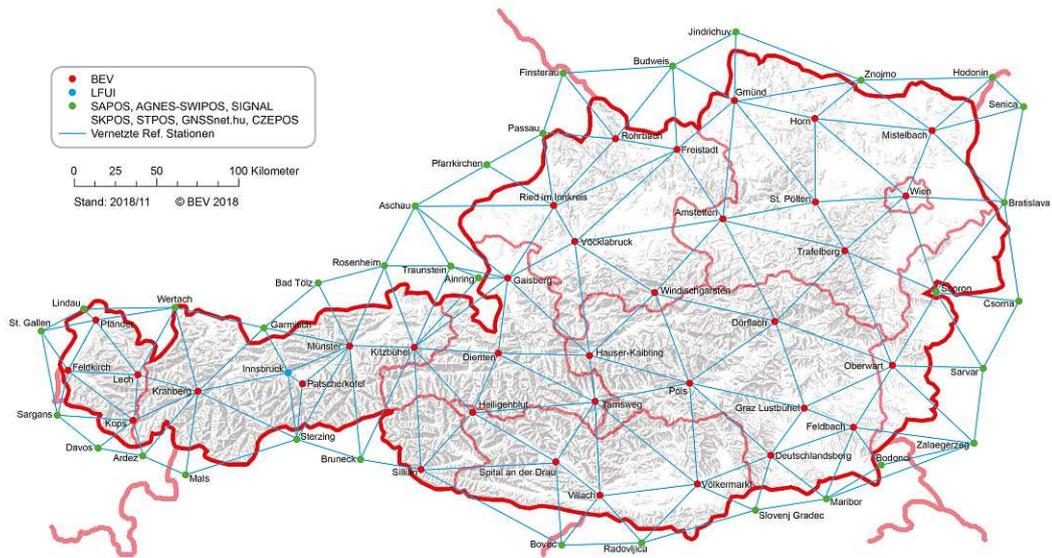


Abbildung 3.3: APOS-Referenzstationsnetz [BEV, 2018]

eine Online-Transformation vom ETRS89 in das Landessystem mit dm-Genauigkeit in Echtzeit durchgeführt werden bzw. die Position (mit verringerter Genauigkeit) im Landessystem bestimmt werden.

Die RTK-Positionsbestimmung im APOS-Referenznetz folgt primär dem *Konzept der virtuellen Referenzstation (VRS)*. Bei diesem Verfahren (siehe Abbildung 3.4) überträgt der Rover seine Näherungsposition einem zentralen Vernetzungsrechner.

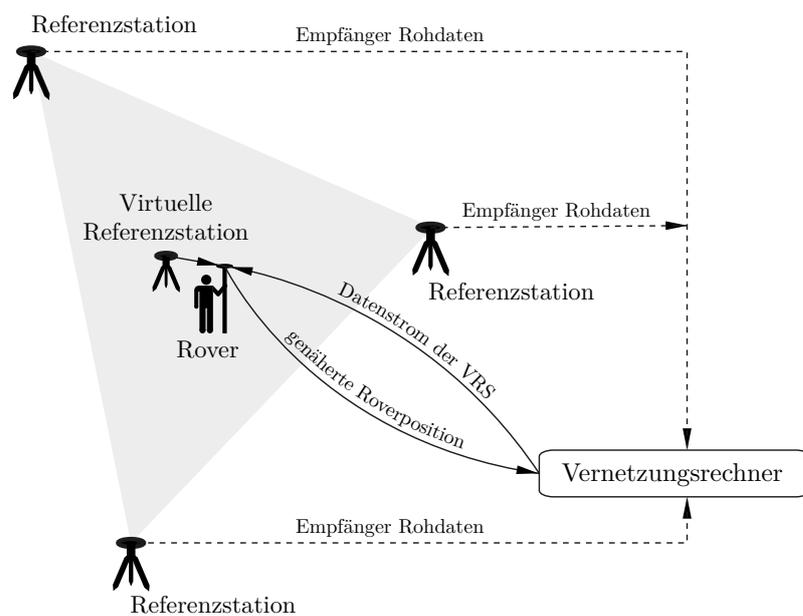


Abbildung 3.4: Konzept der virtuellen Referenzstation; in Anlehnung an [BEV, 2019]

Ebenfalls werden an diesen Rechner die Messdaten der den Rover umgebenden Referenzstationen übertragen. Nun lassen sich Beobachtungen für eine fiktive (virtuelle) Referenzstation unmittelbar in der Nähe des Rovers generieren. Somit ist die Position der VRS die aus der Navigationslösung des Empfängers erhaltene und an die Rechenzentrale übermittelte Position. Der Rover kann nun aus diesen synthetischen (Phasen-)Messdaten der VRS und den eigenen Messdaten die kurze Entfernung zur virtuellen Station exakt ableiten und diesen kleinen Vektor zur Position der virtuellen Referenzstation hinzufügen.

Eine weitere Möglichkeit zur RTK-Positionsbestimmung ist das *Master-Auxilliary-Konzept* (MAC) (siehe Abbildung 3.5). Hier wird ein Großteil der Berechnungen direkt am Rover vorgenommen. Der Rover sendet seine Näherungsposition an die Zentrale und erhält die Beobachtungsdaten aller Satelliten der nächstgelegenen Permanentstation (Master-Station). Von den umliegenden Stationen (Auxilliary-Stationen) werden in der Zentrale, für alle mit der Master-Station gemeinsam beobachteten Satelliten mit gelöster Mehrdeutigkeit, Strecken-Korrekturen berechnet und an den Rover übermittelt. Aus diesen Daten kann der Rover, mit eigenen Berechnungsmodellen, seine Position bestimmen. Somit ist in der Zentrale kein Modell nötig bzw. muss dies dem Rover auch nicht bekannt sein. Nachteilig ist die, im Vergleich zur VRS-Methode, längere Initialisierungszeit aufgrund der wesentlich längeren Basislinie zur Master-Station und der weitaus größeren Datenmenge, die von der Zentrale an den Rover gesendet wird. Beide Verfahren liefern jedoch im Idealfall identische Ergebnisse. Unter optimalen Bedingungen liegt die erreichbare RTK-Genauigkeit im ETRS89 bei  $\pm 1.5$  cm für die Lage und  $\pm 4.0$  cm für die Höhe [BEV, 2019].

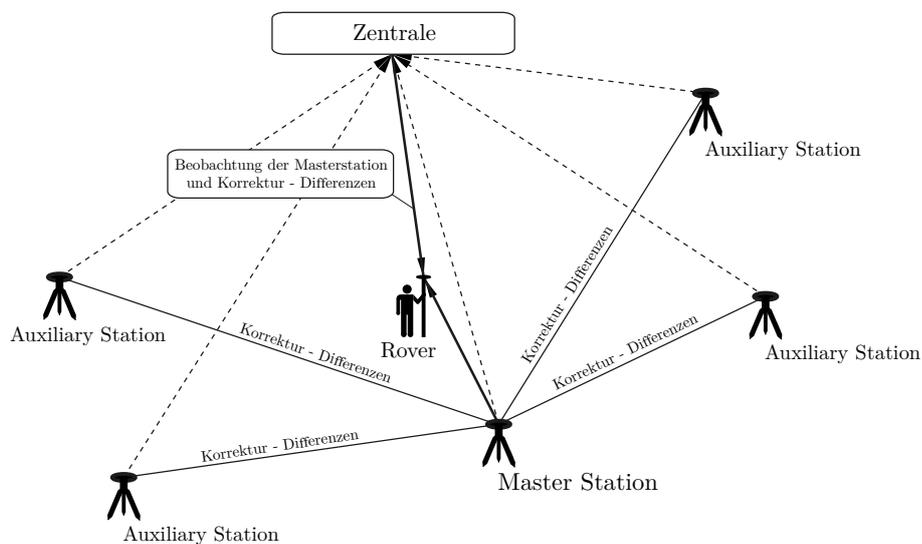


Abbildung 3.5: Master-Auxilliary-Konzept; in Anlehnung an [BEV, 2019]

### 3.2.2 EPOSA

EPOSA ist aus der Partnerschaft von Energie Burgenland AG, ÖBB Infrastruktur AG und Wiener Netze GmbH entstanden. Prinzip und Aufbau von EPOSA ähneln dem von APOS, weswegen nur die markantesten Unterschiede betrachtet werden. EPOSA besitzt eine etwas geringere Anzahl homogener verteilter Referenzstationen und verfügt über keine vollständige länderübergreifende Vernetzung mit sämtlichen benachbarten Vermessungsverwaltungen. Ferner wird ausschließlich das VRS-Konzept verwendet. Als globaler Koordinatenrahmen der Referenzstationen und Nutzerpositionen dient die Realisierung ITRF2014 zur Epoche 2010.0. Wie auch mit APOS können aus globalen Koordinaten österreichische Landeskoordinaten generiert werden. Verwendet wird eine 7-Parameter Transformation und ein etwas größerer Korrekturraster (Maschenweite  $45'' \times 45''$ ). Abhängig vom Korrekturdatenstrom können die Rover-Koordinaten auch im ETRF89 bestimmt werden. Das Genauigkeitsniveau entspricht dem von APOS [EPOSA, 2018].

### 3.2.3 RBMC-IP



Abbildung 3.6: RBMC-IP Referenznetz; [IBGE, 2018]

Österreich und ganz allgemein Europa ist bezüglich RTK-Anbieter gut situiert. Aus globaler Sicht ist RTK jedoch aufgrund nicht-flächendeckender Referenznetze er-

heblich eingeschränkt. Die bestehenden Netze sind zudem inhomogen, wodurch die Positionierungskonsistenz sinkt. Als Beispiel<sup>2</sup> sei hier der brasilianische Positionierungsdienst *Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo* (RBMC-IP) angeführt. Das Netz besteht aktuell aus 104 Stationen (siehe Abbildung 3.6). Daraus ergibt sich eine mittlere Flächendichte der Stationen von rund  $81900 \text{ km}^2/\text{Station}$ ; zum Vergleich: APOS besitzt durchschnittlich alle  $2400 \text{ km}^2$  eine Station. Aufgrund der starken Inhomogenität kann RBMC-IP zwar partiell cm-Genauigkeit bereitstellen, für viele Gebiete ergeben sich dadurch aber sehr lange Basislinien (bis zu 500 km) und die Genauigkeit sinkt in den dm-Bereich [IBGE, 2018].

### 3.3 PPP – Precise Point Positioning

Anders als bei differenziellen Methoden wird bei dem jüngeren Verfahren *Precise Point Positioning* (PPP) auf lokale und regionale Referenzstationen verzichtet. Durch Kombination von präzisen Satellitenpositionen und -uhren, Berücksichtigung zahlreicher Korrekturen in Form geeigneter Modelle sowie Zweifrequenz-Code- und Phasenbeobachtungen können mit PPP präzise Positionslösungen erreicht werden. Problematisch ist die Mehrdeutigkeitenfixierung, welche sich deutlich schwieriger gestaltet als bei einer relativen Auswertung, hauptsächlich aufgrund nicht modellierter Restfehler. Die Mehrdeutigkeiten können meist nicht als Integer fixiert, sondern nur als Float-Lösungen geschätzt werden. Dies führt zu sehr langen Konvergenzzeiten<sup>3</sup> (gegebenfalls  $> 1 \text{ h}$ ) und dementsprechend langen Beobachtungszeiten. Konvergiert die Lösung, können jedoch Genauigkeiten von wenigen Zentimetern erreicht werden. Die Reduzierung der Konvergenzzeit ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

Die für PPP obligaten präzisen Ephemeriden und Satellitenuhren werden anhand von Satellitenbeobachtungen global verteilter Stationen berechnet und als Produkte von Analysezentren, wie z. B. vom *International GNSS Service* (IGS), kostenfrei zur Verfügung gestellt. Diese Produkte (Tabelle 3.2) unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Latenz von den ungenaueren extrapolierten Broadcast-Daten, welche in der Navigationsnachricht über das vom Satelliten gesendete Signal empfangen werden.

Bei statischen Messungen mit Final-Produkten und mehreren Stunden Konvergenzzeit kann hiermit eine Positionsgenauigkeit von einigen Millimetern erreicht werden. Mit den vorhergesagten Ultra-Rapid Produkten könnte zwar grundsätzlich ei-

<sup>2</sup>Dieses Beispiel wurde gewählt, da Brasilien eines der großen Absatzländer der Plasser & Theurer G.m.b.H ist

<sup>3</sup>Konvergenz: Lösungen erreichen ein Genauigkeitsniveau ohne dieses Niveau zu verlassen

ne Echtzeitpositionierung durchgeführt werden, angesichts der geringen Genauigkeit der vorhergesagten Satellitenuhr ( $2.5 \text{ ns} \hat{=} \text{ca. } 0.75 \text{ m}$ ) ist diese Lösung allerdings irrelevant.

Typ		Genauigkeit	Latenz	Aktualisierung	Sample-Intervall
Broadcast	Orbits	$\sim 100 \text{ cm}$			
	Uhren	RMS $\sim 5 \text{ ns}$	Echtzeit		täglich
	(Sat.)	$\sigma \sim 2.5 \text{ ns}$			
Ultra-Rapid (predicted)	Orbits	$\sim 5 \text{ cm}$			
	Uhren	RMS $\sim 3 \text{ ns}$	Echtzeit	3:00, 9:00, 15:00 und 21:00 UTC	15 min
	(Sat.)	$\sigma \sim 1.5 \text{ ns}$			
Ultra-Rapid (observed)	Orbits	$\sim 3 \text{ cm}$			
	Uhren	RMS $\sim 150 \text{ ps}$	3–9 h	3:00, 9:00, 15:00 und 21:00 UTC	15 min
	(Sat.)	$\sigma \sim 50 \text{ ps}$			
Rapid	Orbits	$\sim 2.5 \text{ cm}$			15 min
	Uhren	RMS $\sim 75 \text{ ps}$	17–41 h	17:00 UTC	5 min
	(Sat. & Stat.)	$\sigma \sim 25 \text{ ps}$			
Final	Orbits	$\sim 2.5 \text{ cm}$			15 min
	Uhren	RMS $\sim 75 \text{ ps}$	12–18 d	jeden Donnerstag	Sat.: 30 s
	(Sat. & Stat.)	$\sigma \sim 20 \text{ ps}$			Stat.: 5 min

Tabelle 3.2: IGS Produkte der GPS-Satellitenorbits und -uhren; [IGS, 2018]

Um den Anforderungen präziser Echtzeit-Anwendungen gerecht zu werden, führte das IGS im Jahr 2013 den Real-Time-Service (RTS) ein, woraus die Methode *Real-Time-PPP* (RTPPP) entstand. Bei den im RTS verfügbaren Produktströmen handelt es sich um Kombinationslösungen, die durch die Verarbeitung einzelner Echtzeitlösungen der teilnehmenden Echtzeitanalysezentren (engl. Real-time Analysis Centers, RTAC) erstellt werden. Diese Produkte werden in Form von drei verschiedenen RTCM-SSR-Streams<sup>4</sup> verbreitet. Positionsgenauigkeiten von kinematischen Lösungen können im Zentimeter- bis Dezimeter-Bereich erwartet werden [Kaplan & Hegarty, 2017], [Zhanga *et al.*, 2018]. Infolgedessen verfügt kinematisches RTPPP (aktuell) über einen geringeren Genauigkeitslevel mit weitaus längeren Konvergenzzeiten als die RTK-Methoden. Ferner ist zu beachten, dass sich die Positionslösungen mit PPP immer auf das geodätische Datum der präzisen Ephemeriden beziehen. Dieses ist typischerweise das aktuelle ITRF (ITRF2014) zur Epoche der Messung.

Für die Anforderungen dieser Arbeit ist RTPPP aufgrund der derzeit noch längeren Konvergenzzeiten unattraktiv. Einige kommerzielle Anbieter nutzen RTPPP jedoch für ihre globalen Positionierungsdienste und versprechen Konvergenzzeiten von wenigen Minuten.

<sup>4</sup>Radio Technical Commission for Maritime Services (RTCM); State Space Representation (SSR); näheres in Kapitel 4.2.1

## 3.4 Kommerzielle PPP-Services

Im Allgemeinen wird bei den präzisen (annähernd) globalen Positionierungsdiensten ein globales Referenznetzwerk (ähnlich wie das IGS) für die Berechnung von präzisen Satellitenbahn- und Uhrkorrekturen genutzt, während ein regionales Netzwerk zur Ermittlung lokaler atmosphärischer Korrekturen verwendet wird. Die Übertragung erfolgt als proprietäres Format mittels geostationärem Satellit bzw. über das Mobilfunknetz. Dadurch werden die Vorteile von schnellerer Initialisierungszeit angesichts des Netzwerkes sowie räumlicher Unbegrenztheit kombiniert.

### 3.4.1 Trimble



Ein diesbezüglich kompetentes Unternehmen ist der kalifornische Konzern *Trimble Inc.*, wohlbekannt als einer der führenden GNSS-Technik Hersteller. Trimble bietet ein Portfolio an kommerziellen Diensten für verschiedene Anwendungen unter Verwendung von GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou und QZSS. Für den Bereich der globalen präzisen Echtzeit-Positionierung wird der Dienst *CenterPoint RTX* bereitgestellt. Voraussetzung ist die Empfangsmöglichkeit des speziellen Formates für RTX-Dienste. Dieses wird nur von ausgewählten Geräten, überwiegend des Trimble Konzerns (Applanix, Spectra Precision, etc.), unterstützt.

#### Trimble CenterPoint RTX

Der seit 2011 verfügbare Dienst, Centerpoint RTX (**R**eal **T**ime **eX**tended), nutzt Echtzeit-Satelliten- und Atmosphärendaten aus einem globalen Referenzstationsnetzwerk sowie verschiedene Modelle und proprietäre Algorithmen, um globale Korrekturen zu generieren. Centerpoint RTX bzw. Trimble RTX-Dienste beruhen somit auf dem PPP-Prinzip. Die Methodik ist in Abbildung 3.7 dargestellt.

Die Korrekturen werden sowohl in Echtzeit per Mobilfunk als auch über geostationäre Satelliten übertragen. Der Empfang durch die Satelliten gewährt hohe Robustheit und Zuverlässigkeit, versagt jedoch in hohen Breiten ( $> 70^\circ$ ). Als Ergebnis können im Idealfall Lage-Genauigkeiten von 2 cm ( $1\sigma$ ) und Höhen-Genauigkeiten von 5 cm ( $1\sigma$ ) mit einer Konvergenzzeit<sup>5</sup> von  $< 15\text{--}30$  Minuten, ohne direkter Verwendung einer Referenzstation, in fast allen Teilen der Welt erwartet werden. In einigen Gebieten ist der Dienst *CenterPoint RTX-Fast* mit einer sehr viel schnelleren Konvergenzzeit von  $< 1\text{--}2$  Minuten verfügbar (siehe Abbildung 3.8). Die ge-

<sup>5</sup>bezogen auf statische Messungen

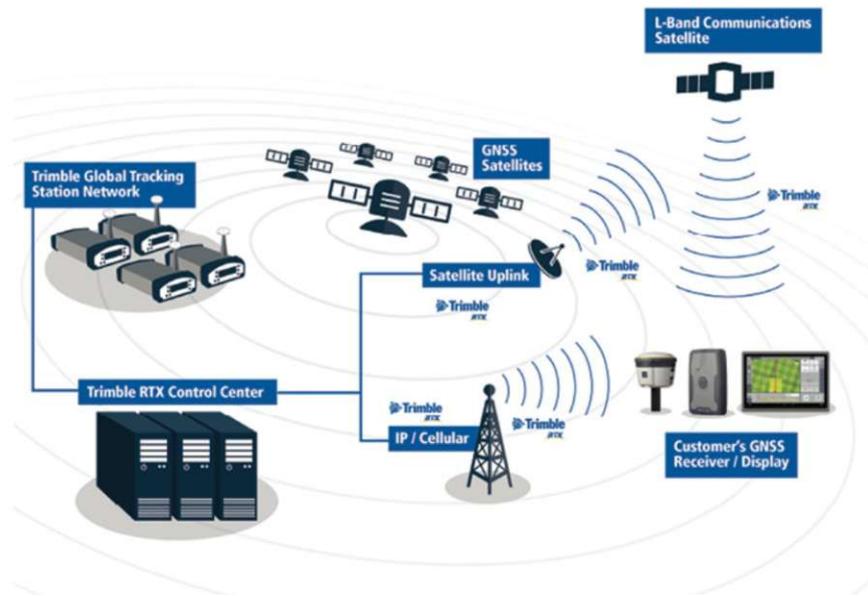


Abbildung 3.7: Methodik CenterPoint RTX; [Trimble Positioning Service, 2019]

nannten Konvergenzzeiten sind abhängig von der Multi-GNSS Unterstützung des Empfängers und variieren außerdem je nach GNSS-Konstellation, Mehrwegeeffekten und Abschattung. Findet ein Verlust des Korrekturstroms  $> 200$  s statt, ist eine Neuinitialisierung notwendig.

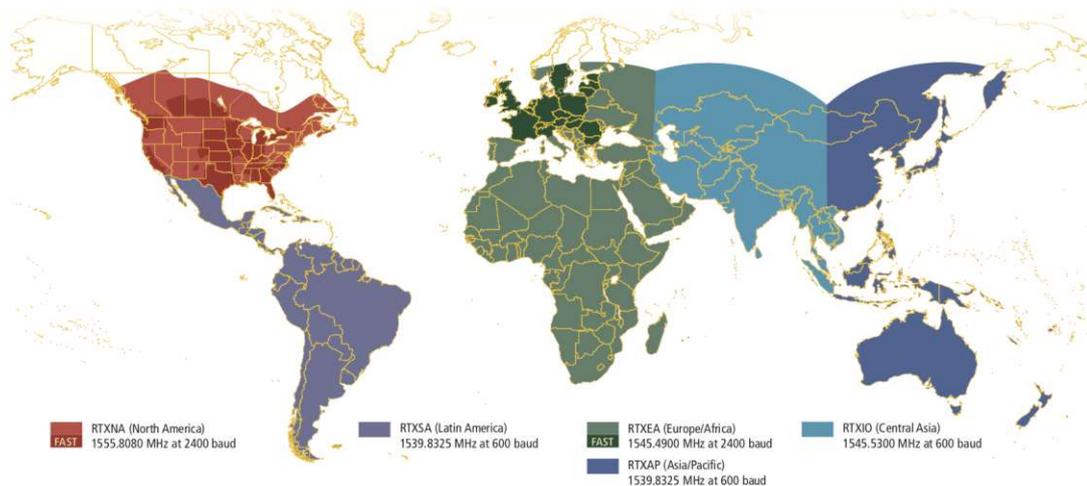


Abbildung 3.8: CenterPoint RTX & RTX-Fast Abdeckung; [Trimble Positioning Service, 2019]

Neben Centerpoint RTX bietet Trimble auch den RTK-Dienst *VRS Now* an. Dieser liefert RTK-typisch höhere  $1\sigma$ -Genauigkeiten (Lage:  $8\text{ mm} + 1\text{ mm/km}$ , Höhe:  $15\text{ mm} + 1\text{ mm/km}$ ) und ist in Teilen Nordamerikas, Europas und Australiens verfügbar. Bemerkenswert ist der für VRS Now erwerbbarer Back-Up-Service *xFill*. Ist die Funk bzw. Mobilfunk Verbindung unterbrochen, werden Korrekturen des Center-

point RTX Dienstes nahtlos bis zu 20 Minuten per Satellit übermittelt, um dadurch zumindest das Centerpoint RTX Genauigkeitslevel aufrechtzuerhalten [Trimble Positioning Service, 2019].

### 3.4.2 Fugro



Ähnlich wie Trimble stellt das niederländische Unternehmen *Fugro* diverse kommerzielle PPP-Dienste zur globalen Positionierung zur Verfügung. Fugro gehört zu den weltweit führenden Anbietern bei Erfassung und Interpretation geobezogener Daten, besonders im Bereich der Offshore-Exploration.

#### Starfix G2+

Der genaueste Dienst nennt sich *Starfix G2+*. Ähnlich dem Prinzip von Trimble werden in einem weltweiten Referenzstationsnetz die GNSS-Signale beobachtet und in Echtzeit verarbeitet, um präzise Korrekturen zu erzeugen. Die resultierenden Positionsgenauigkeiten sind in der Lage  $< 3 \text{ cm}$  ( $2\sigma$ ) bzw. in der Höhe  $< 6 \text{ cm}$  ( $2\sigma$ ) und somit vergleichbar mit Trimble's Centerpoint RTX. Die Bereitstellung der Korrekturen erfolgt, ebenfalls wie bei Trimble, durch geostationäre Satelliten sowie Mobilfunk (RTCM via NTRIP) [Fugro, 2019].

### 3.4.3 OmniSTAR



Aus Popularitätsgründen werden noch die zwei genauesten Dienste des Anbieters OmniSTAR<sup>6</sup> rudimentär angeführt. Beide Dienste erreichen hinsichtlich Genauigkeit nicht das Niveau der Dienste Centerpoint RTX und Starfix G2+.

#### OmniSTAR HP

Der genaueste Dienst, *OmniSTAR HP* (High Performance), erreicht bei einer maximalen Konvergenzzeit von 45 Minuten eine  $2\sigma$ -Genauigkeit von 5–10 cm. Der Korrekturdatenstrom wird wie bei CenterPoint RTX und Starfix über geostationäre Satelliten oder über das Internet an den Empfänger gesendet. OmniSTAR HP ist

<sup>6</sup>Omnistar gehört ebenfalls zur Fugro AG. Seit 2011 besteht eine Kooperation mit Trimble (Erwerb von Vermögenswerten).

hingegen kein globaler Dienst. Speziell in großen Teilen Asiens, Zentralafrika sowie Südamerika ist OmniSTAR HP infolge geringer Stationsanzahl nicht verfügbar.

## OmniSTAR G2

Ein Dienst, welcher nahezu globale Abdeckung gewährt, ist *OmniSTAR G2* (GPS + GLONASS). Dieser Dienst enthält zusätzlich GLONASS-Satelliten plus Korrekturdaten. Durch die gegenüber OmniSTAR HP erhöhte Anzahl der verfügbaren Satelliten wird eine bessere Verfügbarkeit und Signalstabilität gewährt. Die  $2\sigma$ -Genauigkeiten betragen 8–10 cm bei einer Konvergenzzeit von unter 20 Minuten [OmniSTAR, 2019].

### 3.4.4 Weitere Anbieter

Zahlreiche weitere Unternehmen bieten PPP-Dienste in einem ähnlichen bis weniger präzisen Genauigkeitsniveau ( $2\sigma$ -Lagegenauigkeit  $< 5$  cm,  $2\sigma$ -Höhen Genauigkeit  $< 10$ – $15$  cm) von regionaler bis nahezu globaler Abdeckung an. Eine akkurate Abhandlung kann in dieser Arbeit nicht erfolgen. Die prominentesten Vertreter und deren genaueste Dienste werden aber in folgender Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Service	Unternehmen
StarFire	NavCom Technology (John Deere Gruppe)
TerraStar X	Hexagon Positioning Intelligence
TerraStar-C PRO	NovAtel (Hexagon Positioning Intelligence Gruppe)
Apex <sup>5</sup>	VERIPOS (Hexagon Positioning Intelligence Gruppe)
Atlas H10	Hemisphere GNSS
C-NavC <sup>2</sup>	Oceaneering International

Tabelle 3.3: Auflistung weiterer bekannter internationaler Positionierungsdienste

Abschließend sei mit Tabelle 3.4 eine Übersicht der wesentlichen Besonderheiten der verschiedenen, in dieser Arbeit relevanten, GNSS-basierten Echtzeit-Positionierungsmethoden angeführt:

RTK Lokal	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Genauigkeit</li> <li>+ prinzipiell global einsetzbar</li> <li>+ vereinfachte Arbeitslogistik hinsichtlich globaler Einsätze</li> <li>+ Mobilfunknetz nicht zwingend notwendig</li> <li>+ hohe Updaterate möglich (Receiver-abhängig)</li> <li>– kurze Basislinien erforderlich (lokale Einschränkung)</li> <li>– zwei Empfänger notwendig</li> <li>– Positionierung der Basis erforderlich</li> </ul>
RTK Netz	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ hohe Genauigkeit</li> <li>o Mobilfunk im Allgemeinen notwendig</li> <li>– beschränkte Updaterate (i. A. 1 Hz)</li> <li>– regional begrenzt</li> <li>– erschwerte Arbeitslogistik hinsichtlich globaler Einsätze</li> <li>– kostenpflichtig</li> </ul>
Kommerzielle PPP-Dienste	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ globale Positionierung möglich</li> <li>+ vereinfachte Arbeitslogistik hinsichtlich globaler Einsätze</li> <li>+ Mobilfunknetz nicht zwingend notwendig</li> <li>o räumlich schwankende Konvergenzzeiten</li> <li>– geringere Genauigkeit gegenüber RTK-Anwendungen</li> <li>– beschränkte Updaterate (i. A. 1 Hz)</li> <li>– kostenpflichtig</li> </ul>

Tabelle 3.4: Wesentliche Eigenschaften präziser GNSS-Methoden

## 4 Einschränkungen und Voraussetzungen

### 4.1 Positionierung der lokalen Referenzstation

Der folgende Abschnitt ist nur für lokale RTK-Anwendungen relevant. Bei dieser Anwendung wird eine eigene Referenzstation verwendet, wodurch auch die eigenverantwortliche Bestimmung der präzisen Position (Standpunkt der Referenzstation) erfolgen muss. Dieser Standpunkt ist im Allgemeinen koordinativ unbekannt und muss durch geeignete Messmethoden bestimmt werden.

Um (homogene) ETRF-Standpunktskoordinaten zu bestimmen, ist ein Anschluss anhand umliegender Referenzstationen möglich. Werden die Rohdaten der Stationen erworben, bzw. die Rohdaten einer VRS, kann im Postprocessing, mit präzisen Produkten von Analysezentren wie dem IGS, die Position des Standpunktes genau bestimmt werden. Die Datenaufnahme im Feld muss aufgrund der präzisen Produkte dementsprechend im Vorfeld durchgeführt werden.

Eine mögliche Alternative ist die Standpunktbestimmung durch eine freie Stationierung mittels Totalstation. Hierbei müssen Beobachtungen zu bekannten Anschlusspunkten getätigt werden. Neben guter Sichtbarkeitsbedingungen zu GNSS-Satelliten, muss der Standpunkt auch die Sichtbarkeit zu den Anschlusspunkten gewährleisten, wodurch dieser Methode sehr aufwändig werden kann (Stichwort: Polygonzug). Allgemein sollten mindestens 3 Punkte angezielt werden, um eine Überbestimmung zu erreichen. Dadurch können die Anschlusspunkte geprüft bzw. instabile Punkte identifiziert werden. Geeignete Anschlusspunkte sind amtliche Festpunkte oder Gleisvermarkungspunkte. Zu beachten ist, dass sich bei ausschließlicher Verwendung von Gleisvermarkungspunkten eine ungünstige Verteilung der Anschlusspunkte ergibt (Punkte parallel zur Gleisführung).

Durch die Verwendung von Festpunkten im Landesystem ergibt sich meist die Problematik der Inhomogenität. Das Festpunktfeld ist durch seine Entstehungsgeschichte (und Veränderlichkeit) spannungsbehaftet. Diese Spannungen werden durch die freie Stationierung an den Standpunkt übertragen. Ist kein lokaler Transformationsparametersatz vorhanden (z. B. aus Passpunkten), ist eine Transformation in das

ETRS/ITRS in absoluter Zentimetergenauigkeit nicht möglich. Die resultierenden Standpunktkoordinaten können im Dezimeterbereich, im Vergleich zu aus GNSS berechneten Koordinaten, differieren. Die Mehrheit des europäischen Raumes hat allerdings die Überführung von homogenen ETRF/UTM Koordinaten bereits abgeschlossen. Die Abbildung von ETRF-Koordinaten in UTM-Koordinaten ist mathematisch exakt definiert und nachvollziehbar. Durch die hohe Homogenität von ETRF-Festpunkten kann durch eine freie Stationierung die selbe Position wie bei einer aus präzisen GNSS-Methoden bestimmten Position erwartet werden.

Es sei erwähnt, dass die Schwierigkeiten der präzisen Positionierung einer Referenzstation ausschließlich für absolute Genauigkeiten relevant sind. Sind präzise relative Genauigkeiten der Roverposition (absolute Genauigkeit im Meterbereich) ausreichend, ist die genannte Problematik unbedeutend. In diesem Fall kann die Referenzstation auch per GNSS-SPP (ohne Korrekturinformation) positioniert werden.

## 4.2 Datenübertragung

Die RTK- als auch die PPP-Positionierung erfordert externe Daten, um präzise Messungen zu generieren. Diese Daten werden von den jeweiligen Betreibern mithilfe des Mobilfunknetzes übertragen. Im Falle einer eigenen Referenzstation und den damit verbundenen Nachteilen (siehe Kapitel 3.1 und 4.1) können diese Korrekturdaten auch über Funk gesendet werden.

Es folgt ein Exkurs der relevanten, im Rahmen präziser GNSS-basierter Messmethoden in Verwendung stehenden Datenformate. Die empfängerspezifischen Rohdaten müssen schließlich in allgemein akzeptierte Standard-Formate konvertiert werden, um Produkte unterschiedlicher Hersteller gemeinsam nutzen zu können. Diese können in Formate für Echtzeitanwendungen und Formate für das Postprocessing gegliedert werden.

### 4.2.1 Formate

**RINEX** (**R**eceiver **I**Ndependent **E**Xchange Format)

Das RINEX-Format ist ein Austauschformat in ASCII-Kodierung für rohe GNSS-Messdaten und findet primär im Postprocessing Bedeutung. RINEX wurde 1989 vom Astronomischen Institut der Universität Bern vorgestellt, um die gleichzeitige Verar-

beitung von Receiverdaten diverser Hersteller zu gewährleisten. Angetrieben durch die Weiterentwicklung bestehender und dem Aufkommen neuer GNSS wird RINEX stets weiterentwickelt. Die aktuelle Version RINEX 3.03 wurde Mitte 2015 veröffentlicht. GNSS-Messdaten werden derzeit auch weiterhin in den älteren Formaten 2.10 und 2.11 ausgetauscht. Die genauen Format-Spezifikationen sind nachzulesen unter „<ftp://igs.org/pub/data/format/rinex303.pdf>“ [IGS, 2018].

### SP3 (Standard Product # 3)

Das SP3-Format wurde 1989 von der U.S. Organisation National Geodetic Survey (NGS) entwickelt, um Orbit- und Uhreninformationen auszutauschen. Es nutzt wie RINEX die systemunabhängige ASCII-Kodierung. Die aktuelle Version SP3-c wurde 2000 veröffentlicht. Prominente Vertreter sind die in Tabelle 3.2 genannten Produkte vom IGS. Diese sind seit 2006 ausschließlich in dem Format SP3-c verfügbar. Die genauen Spezifikationen sind nachzulesen unter „<ftp://igs.org/pub/data/format/sp3c.txt>“ [IGS, 2018].

### RTCM (Radio Technical Commission for Maritime Services)

Das Special Committee No. 104 (SC-104) der U.S. Organisation Radio Technical Commission for Maritime Services entwickelte das Format RTCM SC-104 (kurz: RTCM) zur Echtzeit-Übertragung von Beobachtungen anhand differenzieller Verfahren. Folglich wird das RTCM-Format auch von Positionierungsdiensten wie APOS oder EPOSA zur Übertragung von Korrekturdaten verwendet. Das aktuellste Format lautet RTCM 10403.3. Die Formatbeschreibung kann unter „<http://www.rtcn.org/differential-global-navigation-satellite-dgnss-standards.html>“ nachgelesen werden.

Ebenfalls hat das SC-104 ein neues Standard-Protokoll<sup>1</sup> erstellt, um Streaming von Differenzkorrekturdaten oder anderen Arten von GNSS-Daten an stationäre oder mobile Benutzer über das Internet zu ermöglichen. Mit dem Titel „*Networked Transport of RTCM via Internet Protocol*“ (Ntrip) ist dieser Standard nach dem RTCM-Datenformat benannt, kann jedoch auch für andere Datenformate verwendet werden [RTCM, 2018].

<sup>1</sup>basierend auf dem Hypertext Transfer Protocol Version 1.1 ([http 1.1](http://1.1))

### NMEA–0183 (National Marine Electronics Association–0183)

1983 hat die NMEA die erste Version des ASCII-Formates NMEA-0183 veröffentlicht. Es dient ganz allgemein zur Übertragung von Positionsdaten, wobei faktisch alle im Navigationsbereich eingesetzten Sensoren NMEA tauglich sind. Beispielsweise kann dadurch die Navigationslösung der genäherten Position des Rovers beim VRS-Konzept an die Referenzstation übermittelt werden. Im November 2018 hat NMEA die neue Version 4.11 veröffentlicht, um u.a. den Aktualisierungen bezüglich GNSS Folge zu leisten. Auf weiterführende Informationen kann unter „[https://www.nmea.org/content/nmea\\_standards/nmea\\_standards.asp](https://www.nmea.org/content/nmea_standards/nmea_standards.asp)“ zugegriffen werden [BEV, 2019], [NMEA, 2018].

#### 4.2.2 Kommunikation mittels Funk

Der Korrekturdatenstrom wird bei RTPPP-Anwendungen per Satellit oder Mobilfunk gesendet. Im Falle der Netz-RTK-Methode, werden die Korrekturdaten i. A. per Mobilfunk im RTCM-Format gesendet<sup>2</sup>. Erfolgt die Positionierung mit einer eigenen lokalen RTK-Referenzstation, können die Korrekturen auch per Funk<sup>3</sup> gesendet werden. Diese Lösung bietet den enormen Vorteil, autark von einem Referenznetz und somit vom Mobilfunknetz zu sein. Die folgende Tabelle 4.1 zeigt anwendungsbezogen, welche Nachteile durch die Übertragung per Funk umgangen werden können.

RTK	Genauigkeitsverlust durch variable RTK-Netzabdeckung
RTK und/oder Mobilfunk	Netzbetreiberwechsel hinsichtlich globaler Einsätze, Messversagen durch nicht erschlossene Netzabdeckung
RTK und Mobilfunk	Regelmäßige Netzbetreiberkosten, Recherche bezüglich Netzbetreiberauswahl

Tabelle 4.1: Nachteile, welche durch Funkübertragung mit einer lokale Referenzstation entfallen

Die Übertragung per Funk weist dagegen andere Besonderheiten/Limitationen auf. Um RTK-Anwendungen grundsätzlich verwenden zu können, ist eine gewisse Datenübertragungsrate zwischen Nutzer und Referenzstation nötig. Sie ist frequenzabhängig und wird über die Anzahl an Informationen pro Zeiteinheit [bit/s] definiert. Allgemein gilt: Je höher die Frequenz, desto höher die mögliche Datenüber-

<sup>2</sup>Exklusiv: Ausnahmen wie z.B. Trimble xFill

<sup>3</sup>Grundsätzlich sind 2 Receiver vom selben Typ notwendig (proprietäres Format)

tragungsrate. Für RTK-Anwendungen muss eine Datenübertragungsrate von mindestens 2400 bit/s gewährleistet werden. Aufgrund dieser Bedingung können nur Frequenzen im VHF<sup>4</sup>-Bereich und darüber genutzt werden.

Neben der Datenübertragungsrate ist die Reichweite ein fundamentaler Aspekt. Sie verhält sich vice versa zur Übertragungsrate. Dies bedeutet mit anderen Worten, je höher die Frequenz, desto niedriger die Reichweite. Ferner sind die frei nutzbaren Frequenzen durch nationale und internationale Gesetze reduziert. Als Konsequenz wird dadurch im niederen UHF<sup>5</sup>-Bereich (400–500 MHz) gearbeitet [Bauer, 2018].

### Reichweite

Die Reichweite des Systems ist primär durch die erlaubte Sendeleistung begrenzt. In Österreich darf ohne eine Bewilligung der entsprechenden Fernmeldebehörde nicht mit  $\geq 2$  Watt gesendet werden. Eine allgemeine Obergrenze ist nicht existent, sondern ergibt sich durch individuelle Bewilligungsverfahren. Diese Vorgehensweise ist basierend auf EU-Recht im nationalen Recht verankert, etwa in der Frequenznutzungsverordnung<sup>6</sup> und der Funkschnittstellen Beschreibungsverordnung<sup>7</sup> [BMVIT, 2019b].

Zusätzlich hängt die Reichweite stark von den örtlichen Gegebenheiten ab. Topographie, lokale Kommunikation und meteorologische Bedingungen spielen eine große Rolle in der möglichen Reichweite der Funk-RTK-Kommunikation [Bauer, 2018].

In dieser Arbeit wird u. a. der GNSS-Empfänger SIGMA (detaillierte Angaben folgen in Kapitel 5.1.1) des kalifornischen Unternehmens JAVAD GNSS, Inc. verwendet, an welchem exemplarisch die theoretische Reichweite erläutert wird. Der Empfänger besitzt einen internen UHF-Transceiver, welcher im Bereich von 406–470 MHz mit einem kleinstmöglichen Kanalabstand von 6.25 kHz arbeitet. Die Ausgangsleistung kann in 1 dB-Schritten zwischen 15–30 dBm (entspricht rund 32 mW–1 W) reguliert werden. Die Empfängerempfindlichkeit<sup>8</sup> beträgt bis zu -114 dBm (bei 2400 bit/s) [SIGMA, 2009].

Ist der Verlust der elektromagnetischen Leistung entlang des Pfades zwischen Sender und Empfänger bekannt, kann die maximale Reichweite berechnet werden. Dieser Pfadverlust  $L$  [dB] setzt sich aus vielen Ursachen (Dämpfung, Absorption, Diffraktion, Beugung, etc.) zusammen und ist deterministisch nur eingeschränkt bestimm-

<sup>4</sup>Very High Frequency; 30–300 MHz

<sup>5</sup>Ultra High Frequency; 300–3000 MHz

<sup>6</sup><https://www.bmvit.gv.at/telekommunikation/recht/aut/verordnungen/fnv.html>

<sup>7</sup><https://www.bmvit.gv.at/telekommunikation/recht/aut/verordnungen/fsbv.html>

<sup>8</sup>Minimale Eingangsleistung um das Signal zu regenerieren

bar, weshalb für simple Abschätzungen empirische Modelle verwendet werden. Ein sehr beliebtes empirisches Modell, welches die spezifische Randbedingungen bezüglich Frequenz, Distanz und Antennenhöhe berücksichtigt, ist das *Okumura-Hata-Ausbreitungsmodell* (4.1), [Molisch, 2011].

$$L = A + B \log_{10} d + C \quad (4.1)$$

Dabei sind A, B (4.2) und C (4.3, 4.4) Faktoren, welche von Übertragungsfrequenz  $f$  [MHz], Sendeantennenhöhe  $h_S$  [m] und Empfängerantennenhöhe  $h_E$  [m] abhängen. Distanz  $d$  [km] ist der horizontale Abstand zwischen Sender und Empfänger.

$$\begin{aligned} A &= 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_S) - a \\ B &= 44.9 - 6.55 \log_{10}(h_S) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Die Funktion  $a$  und der Faktor  $C$  hängen zusätzlich von der Umgebung ab. Beispielsweise gilt für ländliche Bereiche ohne Hindernisse:

$$\begin{aligned} a &= (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)h_E - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \\ C &= -4.78(\log_{10}(f))^2 + 18.33 \log_{10}(f) - 40.94 \end{aligned} \quad (4.3)$$

In Großstädten wird die Übertragung durch Hindernisse im Allgemeinen stärker gedämpft. Es ergeben sich deutlich mehr Interferenzen der direkten Welle mit den von den Hindernissen reflektierten Wellen. Für  $a$  und  $C$  gelten hier folgende Werte:

$$\begin{aligned} a &= 3.2(\log_{10}(11.75h_E))^2 - 4.97 \\ C &= 0 \end{aligned} \quad (4.4)$$

Bei einer Sendeleistung von 30 dBm<sup>9</sup> und einer Empfängerempfindlichkeit von mindestens -114 dBm ergibt sich ein maximaler Pfadverlust  $L$  von 144 dBm. Formel 4.1 umgestellt auf die Reichweite  $d$  (4.5) ergibt

$$d = 10^{(L-A-C)/B} \quad (4.5)$$

Mit einer mittleren Frequenz von 438 MHz, der Sendeantennenhöhe von 2 m und einer Empfängerantennenhöhe von 4.25 m (Montage auf Zug) ergibt sich unter optimalen Bedingungen in ländlichen Gebieten eine maximale Reichweite von rund 9.2 km. In urbanen Bereichen sinkt diese stark auf rund 2 km. Die folgenden Abbildungen 4.1

<sup>9</sup>maximale Ausgangsleistung des SIGMA Empfängers

und 4.2 veranschaulichen Frequenz und Antennenhöhe in Bezug zur Reichweite. Sie zeigen, dass sowohl die Frequenz als auch die Sendeantennenhöhe wesentlich sind. In ähnlicher Weise kann die Reichweite durch Erhöhung der Empfängerantenne gesteigert werden. Diese Variation wird nicht untersucht, da die Empfängerantenne in der Praxis am Zug befestigt ist.

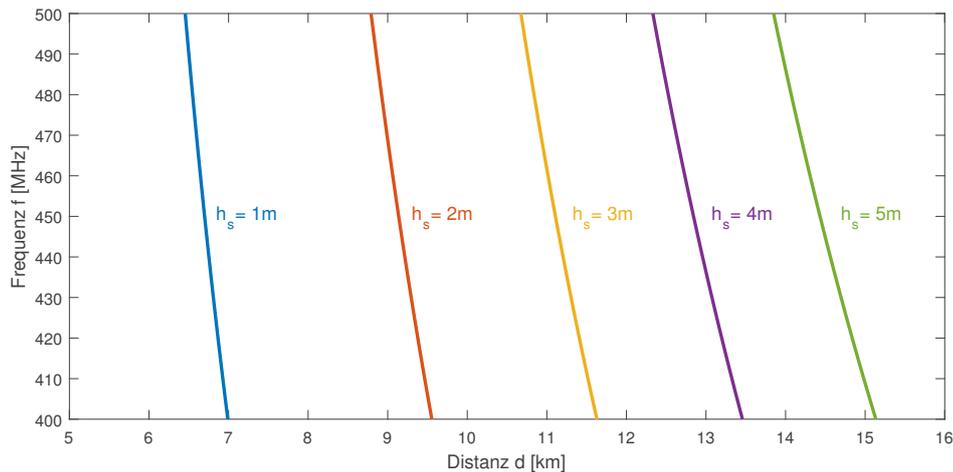


Abbildung 4.1: Frequenz- und Höhenabhängigkeit hinsichtlich Reichweite; Okumura-Hata-Ausbreitungsmodell;  $h_E = 4.25$  m; ländliche Umgebung

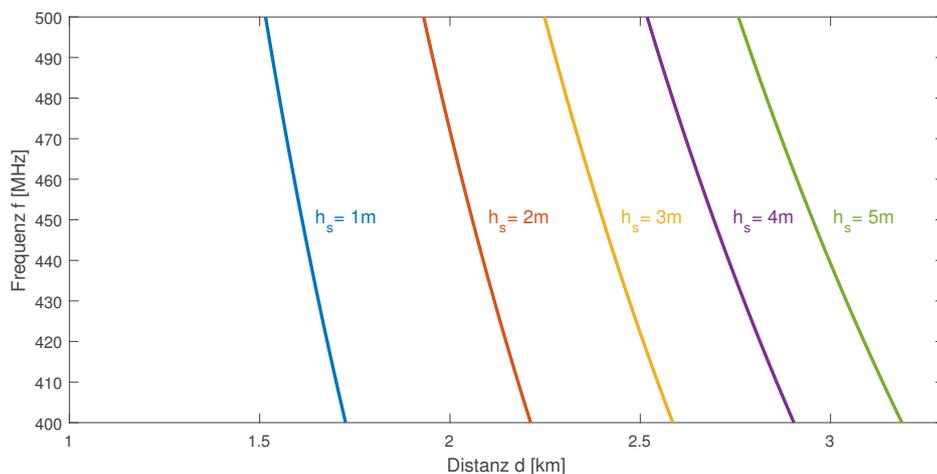


Abbildung 4.2: Frequenz- und Höhenabhängigkeit hinsichtlich Reichweite; Okumura-Hata-Ausbreitungsmodell;  $h_E = 4.25$  m; urbane Umgebung

Wird eine hohe Datenübertragungsrate benötigt (19200 bit/s), um z. B. die Korrekturdaten vieler verschiedener GNSS zu übertragen, sinkt die Empfängerempfindlichkeit auf -110 dBm. In Abbildung 4.3 wird diese Verminderung gegenüber der geringen Übertragungsrate von 2400 bit/s demonstriert. Im Falle einer Sendeantennenhöhe von 2 m bedeutet dies eine weitere Reichweitenreduzierung von rund 400 m auf 1.7 km Maximalreichweite.

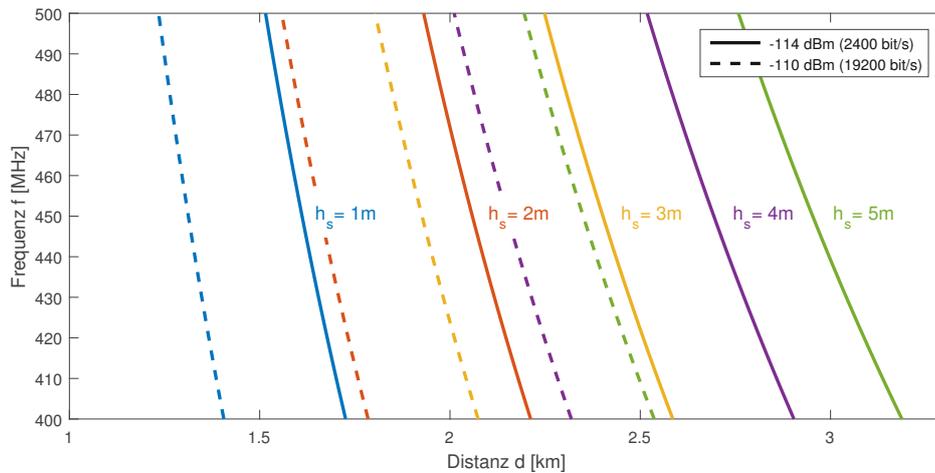


Abbildung 4.3: Reichweitenunterschied hinsichtlich Empfängerempfindlichkeit; Okumura-Hata-Ausbreitungsmodell;  $h_E = 4.25$  m; urbane Umgebung

Das Okumura-Hata-Modell spiegelt zu alternativen Ausbreitungsmodellen, speziell im ländlichen Bereich, einen eher geringen Pfadverlust wider. Es ist hier somit als optimistisch zu betrachten. Speziell auf dominante Hindernisse sowie auf schnelle Änderungen im Gelände folgt eine nur träge Reaktion [Molisch, 2011]. Wie in Kapitel 3.1 erläutert, kann ohne Referenznetz nur bei kurzen Basislinien von maximal einigen Kilometern eine Zentimetergenauigkeit erreicht werden. In urbanen oder topographisch ähnlichen Gebieten kann der Pfadverlust somit eine gravierende Einschränkung darstellen.

### 4.2.3 Kommunikation mittels Mobilfunknetz

Ist der Pfadverlust zu groß oder wird ein RTK-Netz verwendet, werden die Daten per Mobilfunk übertragen. Unter dem Begriff Mobilfunk wird ganz allgemein der Betrieb von beweglichen Funkgeräten verstanden. Mittlerweile wird dieser Begriff synonym für die Datenübertragungstechnik in der mobilen Telefonie verwendet.

In den achtziger Jahren wurde in Europa mit der Entwicklung eines digitalen Mobilfunkstandards begonnen. Er sollte europaweit verpflichtend werden und die untereinander nicht kompatiblen analogen Mobilfunkssysteme ablösen. Die Bereitstellung begann Anfang der Neunziger und wurde bereits wenige Jahre später in den meisten Teilen der Welt eingeführt: das *Global System for Mobile Communications (GSM)*. Gesendet wird auf den Frequenzbereichen rund um 850, 900, 1800 und 1900 MHz<sup>10</sup>.

<sup>10</sup>900/1800 MHz: Europa, Asien, Australien, Naher Osten und Afrika

850/1900 MHz: USA, Kanada, Mexiko und die meisten Länder Südamerikas

Die Datenübertragungsrate beträgt 9.6–14.4 kbit/s und ist damit bei Verwendung von nur einem GNSS für RTK (mit 1 Hz) ausreichend [Molisch, 2011].

GSM wurde für die mobile Telefonie ausgelegt. Mit der steigenden Nachfrage nach schnelleren Datendiensten musste eine effektivere Datenübertragung bewerkstelligt werden. Sukzessiv wurde GSM durch verschiedene Techniken erweitert, welche kurz und chronologisch vorgestellt werden:

- HSCSD (High Speed Circuit Switched Data)  
Durch Bündelung von vier Kanälen (theoretisch bis zu 8) entstand HSCSD, wodurch eine Datenübertragungsrate von 57.6 kbit/s erreicht werden kann.
- GPRS (General Packet Radio Service)  
Mit GPRS wurde die paketorientierte Übertragung eingeführt. In der Praxis werden Geschwindigkeiten von etwa 80 kbit/s erzielt.
- EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)  
Mit EDGE wurde ein weiterentwickeltes Modulationsverfahren (8-PSK) eingeführt, welches die bestehenden Dienste zu ECSD und EGPRS aufwertet. Mit EDGE können Übertragungsraten von bis 240 kbit/s erreicht werden.

Folglich ist die GSM/GPRS-Technik zur Korrekturdatenübermittlung (maximale Datenübertragungsrate der SIGMA Antenne  $\approx 38$  kbit/s) sämtlicher aktuell in Betrieb befindlicher GNSS ausreichend.

Vollständigkeitshalber sei erwähnt, dass GSM der Standard der sogenannten zweiten Generation (2G) ist und mittlerweile die untere Grenze der mobilen Datenübertragung bildet. Die aktuelle vierte Generation (Long-Term-Evolution-Advanced, LTE-Advanced oder LTE+) leistet eine weit höhere Datenübertragungsrate von bis zu 600 Mbit/s [Molisch, 2011].

## Mobilfunk in Österreich

In Österreich agieren derzeit bundesweit die drei Telekommunikationsunternehmen, A1 Telekom, T-Mobile und Hutchison Drei. Die gemeinsame (theoretische) Mobilnetzversorgung wird in Abbildung 4.4 gezeigt. Sie erfolgt auf Basis freiwillig gelieferter Versorgungsdaten der Telekommunikationsunternehmen und wird in Form von statistischen Daten pro Planquadrat (100 × 100 Meter) dargestellt [BMVIT, 2019a]. Auffällig, aber nicht unerwartet, ist die geringere Abdeckung an exponierten Orten wie im alpinen Bereich.

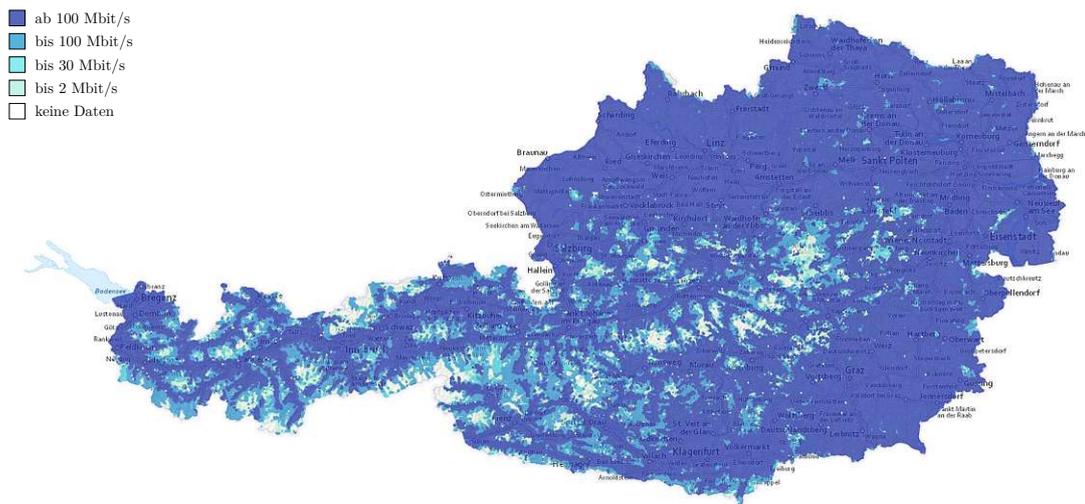


Abbildung 4.4: Mobilnetzversorgung Österreich [BMVIT, 2019a]

In dieser Arbeit ist die GSM-Abdeckung der knapp 10000 km langen Gleisanlage der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) von speziellem Interesse. Auskunft hierfür liefert das Funksystem GSM-Railway (GSM-R). GSM-R wurde in einem europaweiten Übereinkommen als der technische Standard der Europäischen Bahnen definiert, ausgehend von den Richtlinien der Europäischen Union zur Interoperabilität des Eisenbahnwesens. Es wird in Europa als großer Erfolg angesehen und wird global ausgebaut. Das österreichische GSM-R Netz ist auf ca. 90% des Streckennetzes ausgebaut (GPRS grundsätzlich verfügbar).

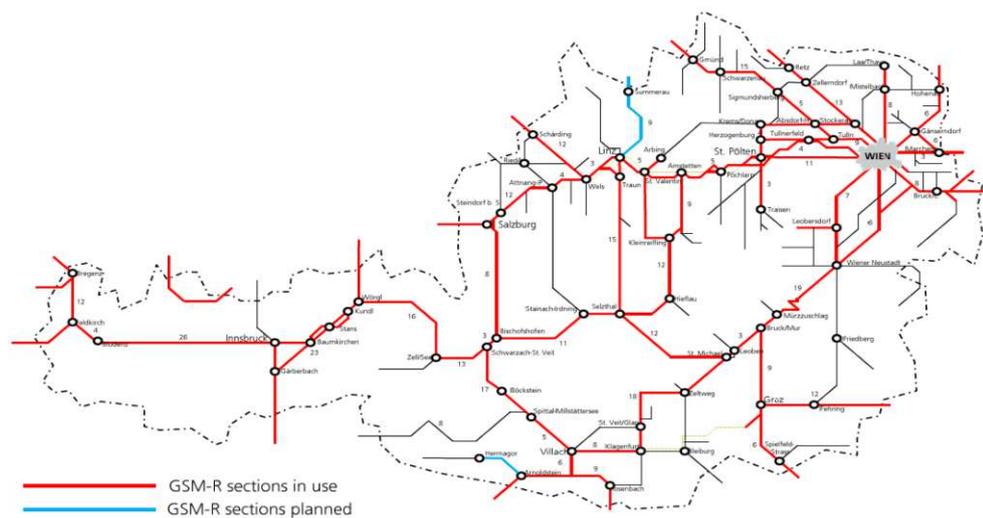


Abbildung 4.5: GSM-R Ausbauplan Österreich [ÖBB, 2019]

Die Nutzung ist für den Bahnverkehr sowie für Bahnfremdfirmen obligat (Sicherheit, Kontakt zum Fahrdienstleiter, Gleisarbeiten, etc.). Die Abbildung 4.5 zeigt den aktuellen Ausbauplan des GSM-R in Österreich. Aktuell fehlen lediglich die zwei Stre-

cken „Linz Hbf/Staatsgrenze nächst Summerau“ und „Arnoldstein/Hermagor“ bis zur vollständigen Abdeckung [ÖBB, 2019]. Ein Vergleich mit Abbildung 4.4 zeigt, dass in diesen Bereichen die mobile Datenübertragung der Telekommunikationsunternehmen optimal ist. Folgerichtig ist in Österreich die vollständige Gleisanlage bis auf etwaige lokale Abschattungen (siehe Kapitel 4.4) für die Nutzung von Netz-RTK- und PPP-Anwendungen geeignet.

### Globale Situation

Rund 87 % der Weltbevölkerung wird durch den Mobilfunk erreicht. Vor allem in Industrieländern ist die 3. und 4. Generation des Mobilfunks bereits ubiquitär. Die restliche Bevölkerung von rund einer Milliarde Menschen, überwiegend in Entwicklungsländern, ist aus größtenteils wirtschaftlichen Gründen kaum erschlossen [GSMA, 2019a]. Eine flächenbezogene Aussage über die globale Abdeckung kann aufgrund vieler unseriöser Angaben nicht ohne weiteres getätigt werden. Erste Anlaufstelle liefert ein Dienst (<http://maps.mobileworldlive.com>) der GSM Association (GSMA). Hier werden länder-, anbieter- und technologieabhängig Informationen zur Netzabdeckung in Form einer vierteljährlich aktualisierten interaktiven Karte zur Verfügung gestellt [GSMA, 2019b].

## 4.3 Satellitengeometrie

In Kapitel 2.2 wurde das allgemeine Signalverhalten sowie eine Übersicht der Fehlerquellen bezüglich der Signallaufzeitmessung gezeigt. Die daraus resultierende Messgenauigkeit wird durch die Satelliten/Nutzer-Konfiguration, ausgedrückt anhand von DOP-Parameter (siehe Kapitel 2.2.8), beeinflusst bzw. gestreut. Die DOP-Parameter sind skalare Größen und wirken wie ein Skalierungsfaktor auf den Streckenfehler (2.15). Sie dienen als Indikatoren der zu erwartenden Positionsgenauigkeit in der Code-basierten Echtzeitpositionierung.

Da die DOP-Parameter auf der Geometrie von Empfänger und Satelliten beruhen, können sie a priori aus Standortinformation und Almanach geschätzt werden. Zur Berechnung der (verschiedenen) DOP-Parameter wird eine Modellmatrix  $A$  aufgestellt. In ihr befinden sich die partiellen Ableitungen der Beobachtungen (Code- und Phasenstrecken) nach den Unbekannten (Koordinaten und Systemzeitoffset). Aus der Modellmatrix  $A$  kann nun die Kofaktormatrix der Unbekannten  $Q_{xx}$  (4.6) berechnet werden.

$$Q_{xx} = (A^T A)^{-1} = \begin{pmatrix} q_{xx} & q_{xy} & q_{xz} & q_{xt} \\ q_{xy} & q_{yy} & q_{yz} & q_{yt} \\ q_{xz} & q_{yz} & q_{zz} & q_{zt} \\ q_{xt} & q_{yt} & q_{zt} & q_{tt} \end{pmatrix} \quad (4.6)$$

Wird nun die Wurzel der gesamten Spur von  $Q_{xx}$  berechnet, erhalten wir den Geometric Dilution of Precision (GDOP) (4.7).

$$GDOP = \sqrt{q_{xx} + q_{yy} + q_{zz} + q_{tt}} \quad (4.7)$$

Wird die Kovarianzmatrix der Unbekannten  $C_{xx}$  mit der Varianz der Gewichtseinheit  $\sigma_{\text{UERE}}^2$  berechnet, kann der GDOP auch angeschrieben werden als

$$GDOP = \frac{\sqrt{\sigma_{x_u}^2 + \sigma_{y_u}^2 + \sigma_{z_u}^2 + \sigma_{t_u}^2}}{\sigma_{\text{UERE}}} \quad (4.8)$$

Weitere gebräuchliche DOP-Parameter:

- PDOP (position dilution of precision)  
enthält nur Positionskomponenten ( $q_{xx}, q_{yy}, q_{zz}$ )
- HDOP (horizontal dilution of precision)  
enthält nur Horizontalkomponenten ( $q_{nn}, q_{ee}$ )
- VDOP (vertical dilution of precision)  
enthält nur die Vertikalkomponente ( $q_{uu}$ )

Für die beiden Parameter HDOP und VDOP ist es notwendig, die entsprechende  $Q_{xx}$ -Matrix in ein North-East-Up-Koordinatensystem zu transformieren.

Zu beachten ist, dass mit horizontnahen Satellitenpositionen gute Schnitteigenschaften erreicht werden, sich jedoch aufgrund mehrerer Faktoren (erhöhter Mehrwegeeffekt, höhere Refraktionswirkung, etc.) die Positionsgenauigkeit verschlechtert. Dementsprechend werden tiefstehende Satelliten durch eine Elevationsmaske (oft 10–15°) ausgeschlossen. Die Satellitenbahn und -anzahl globaler GNSS wurde so gewählt, um die permanente Sichtbarkeit zu mindestens vier Satelliten an jedem

Punkt der Erde gewährleisten zu können. Aus der Bahninklination ergeben sich in hohen Breiten schließlich Gebiete ohne Satellitenüberflug (Nord- und Südloch) und folglich schlechtere DOP-Werte [Bauer, 2018].

Zur Prognose der Satellitenkonstellationen aus Almanachdaten und damit zur DOP-Berechnung dienen vielfältige Anwendungen wie die kostenpflichtige und umfangreiche Software „Javad Justin“, aber auch unentgeltliche Open-Source-Programme wie „RTKLIB“ sowie auch triviale webbasierte Applikationen wie „Trimble GNSS Planning Online“.

Global betrachtet können gegenwärtig theoretisch selbst in hohen Breiten dank einer Vielzahl verfügbarer GNSS-Satelliten<sup>11</sup> (siehe Abbildung 4.6) sehr niedrige DOP-Werte ( $GDOP < 4$  gilt als sehr gute Konfiguration) erreicht werden. Es sei hier erwähnt, dass prinzipiell mindestens vier Satelliten erforderlich sind, um eine Position zu berechnen (siehe Kapitel 2.2.1). Werden Satelliten verschiedener GNSS empfangen (Multi-GNSS), muss der Empfänger aufgrund der unterschiedlichen Zeitskalen jedoch fünf oder mehr Satelliten erfassen.

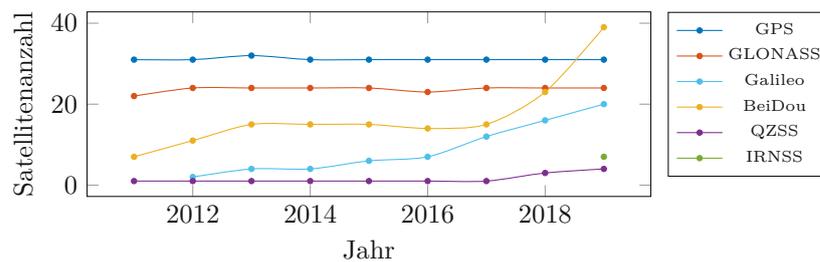


Abbildung 4.6: Anzahl operationeller GNSS-Satelliten; jeweils am 1. Jänner des gewählten Jahres  
Abgeleitet aus Daten von Trimble GNSS Planning Online [2019]

Exemplarisch werden in Abbildung 4.7 und Abbildung 4.8 die Satellitenverfügbarkeit sowie die DOP-Parameter für einen mittleren Breitenbereich (nähe Angern an der Nordbahn, Österreich) dargestellt. Gut erkennbar ist, neben Größenordnung und zeitlicher Variation, die Korrelation zwischen Satellitenanzahl und DOP-Parameter. Nicht nur die bloße Anzahl, auch die Anzahl systemkonformer Satelliten ist relevant, da nur dadurch eine homogene Verteilung der Satelliten gesichert ist. Aus solchen Analysen können (theoretisch) günstige Beobachtungszeiten abgeleitet werden, wobei selbst bei Verwendung von nur GPS- und GLONASS-Satelliten der GDOP-Parameter zu 95 % des Tages bei  $< 2$  liegt. Dieses Beispiel wurde gewählt, da in Kapitel 5 ausgewertete Testdaten der Plasser & Theurer Ges.m.b.H mit diesem Beispiel örtlich sowie zeitlich kongruieren.

<sup>11</sup>GLONASS liefert hier einen wesentlichen Beitrag dank höherer Inklinationen

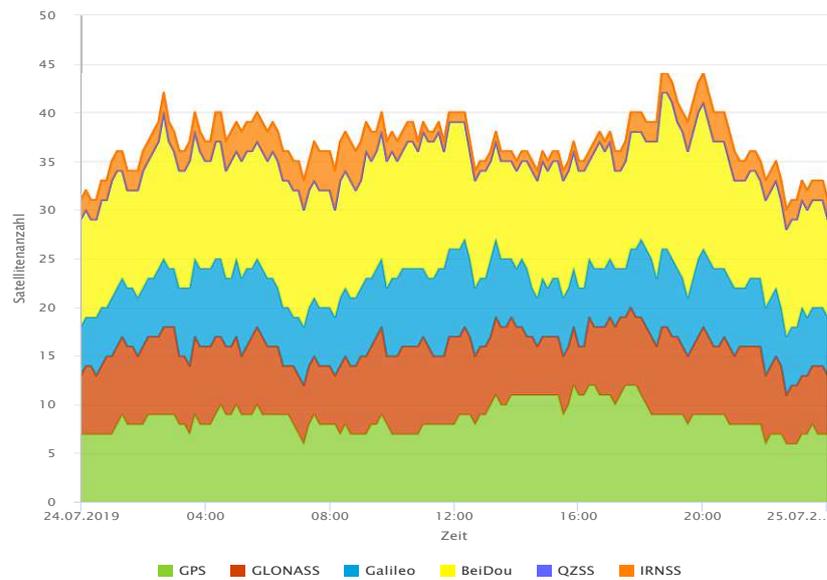


Abbildung 4.7: Maximale Anzahl sichtbarer GNSS-Satelliten  
24. Juli 2019 UTC nahe Angern, Elevationsmaske 10°; [Trimble GNSS Planning Online, 2019]

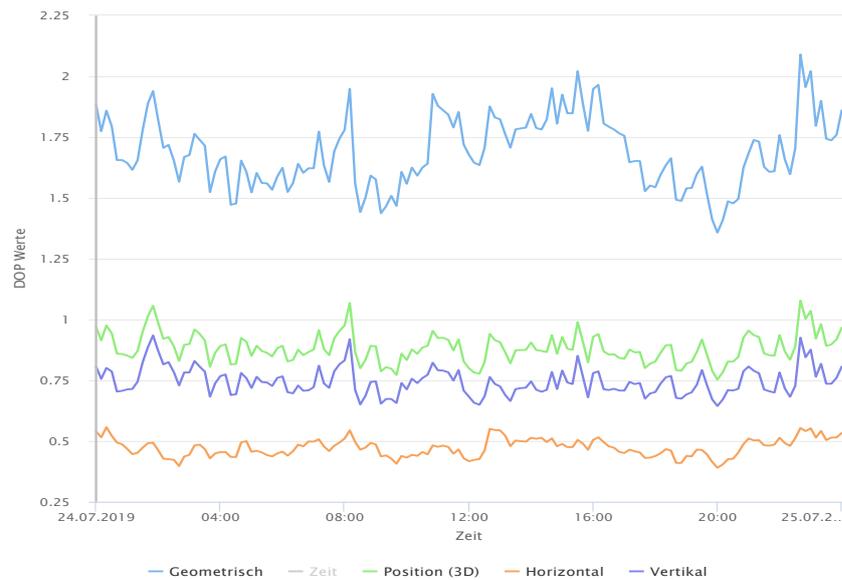


Abbildung 4.8: Theoretische DOP-Parameter bei Verwendung sämtlicher GNSS  
24. Juli 2019 UTC nahe Angern, Elevationsmaske 10°; [Trimble GNSS Planning Online, 2019]

In dieser Arbeit werden ausschließlich RTK- und kommerzielle PPP-Anwendungen (=phasenbasierte Anwendungen) diskutiert. Der Aspekt der Satellitengeometrie tritt dadurch in den Hintergrund. Im Falle der phasenbasierten GNSS-Positionierung liefert das Produkt  $UERE \cdot DOP$  keine aussagekräftigen Genauigkeiten, sondern wäre um weitere Einflussfaktoren wie den prozentuellen Anteil der fixierten Mehrdeutigkeiten, Anzahl der beobachteten Frequenzen etc. zu erweitern; siehe ADOP Teunissen & Odijk [1997]. Eine gute Satellitengeometrie fördert jedenfalls die Fähigkeit zur schnelleren und korrekten Mehrdeutigkeitenfixierung.

Demzufolge sind die Antennen eines GNSS-Referenznetzes i. A. gut positioniert. Die zugehörigen Empfänger decken ein breites Frequenzspektrum ab und weisen genügend Kanäle auf, um möglichst viele Signale verschiedener GNSS simultan empfangen zu können bzw. eine möglichst hohe Satellitenverfügbarkeit zu erreichen. Wird eine eigene lokale Referenzstation verwendet, sind diese Eigenschaften zu erfüllen. Für den Nutzer bzw. Rover ist zu beachten, dass die Satellitenverfügbarkeit von theoretischer Natur und in vielen Fällen zu optimistisch ist. Sichthindernisse, verursacht durch die lokal umgebende Topografie (Gelände, Vegetation und Bauwerke), werden nicht mitberücksichtigt. Diese Hindernisse können die Sichtbarkeit des Nutzers wesentlich einschränken und werden unter dem Begriff „Abschattung“ zusammengefasst.

## 4.4 Abschattung

Die Abschattung hat zur Folge, dass kein Signal aus dieser Richtung empfangen werden kann. Dadurch verringert sich die sichtbare Satellitenanzahl und verschlechtert häufig die Schnittgeometrie. Dies kann zu sehr viel höheren DOP-Parametern führen. In sehr ungünstigen Fällen, z. B. unter Brücken, kann als Folge keine Positionslösung berechnet werden. Naturgemäß sind vor allem Satelliten mit niedriger Elevation betroffen. Bei kurzzeitigen Abschattungen und geringer Satellitenanzahl können auch Cycle Slips (siehe Kapitel 3.1) zu einer grob-falschen Position führen.

Ein Datensatz der Plasser & Theurer Ges.m.b.H. soll beispielhaft diese Auswirkung darstellen. Die Aufnahme erfolgte am 15. März 2018 um ca. 12:00–13:00 Uhr, wobei die tatsächliche Messfahrt ca. eine halbe Stunde (Maximalgeschwindigkeit 103 km/h) dauerte. Sie erfolgte auf der Weststrecke von Amstetten nach St. Valentin ( $\approx 37$  km). Verwendet wurde der bereits in Kapitel 4.2.2 erwähnte Empfänger SIGMA. Zur Betrachtung werden die aufgenommenen Rohdaten im Format RINEX 2.11 verwendet. Sie beinhalten Beobachtungen von GPS und GLONASS; Messfrequenz 1 Hz. Aufgrund der ebenen Topographie und entsprechender Antennenhöhe ist auf dieser Strecke eine gute Sichtbarkeit gewährleistet. Abbildung 4.9 zeigt die während der Fahrt beobachteten Satelliten. Die ausgegrauten Beobachtungen befinden sich innerhalb der Elevationsmaske von  $15^\circ$ . Hervorgehoben sind die 14 Satelliten um 12:20 UTC (erkennbar an der Ordinatenbezeichnung,  $G \hat{=} GPS$ ,  $R \hat{=} GLONASS$ ). Diese Beobachtung deckt sich mit einer theoretischen Beobachtung mit z. B. Trimble GNSS Planning Online.

Im Gegensatz zu den theoretischen Beobachtungen sind diese nicht mehr kontinuierlich, sondern ab Fahrtbeginn (ca. 12:28 UTC) wiederholt unterbrochen. Denkbare

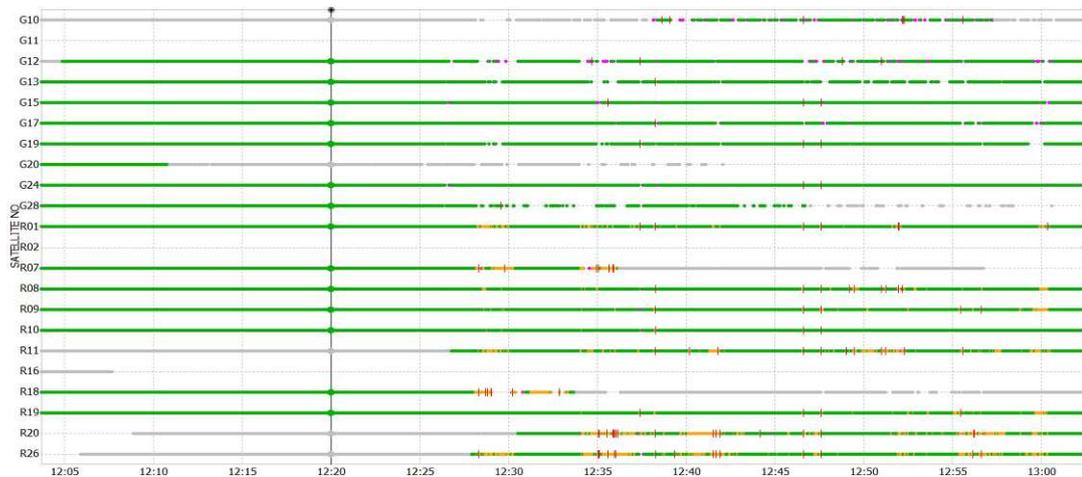


Abbildung 4.9: Satellitenverfügbarkeit (GPS & GLONASS)  
15. März 2018 12:04–13:03 UTC, Testfahrt Amstetten/St.Valentin; [RTKLIB, 2019]

Gründe dafür sind primär die Abschattung, aber auch Mehrwegeeffekte und spontane Antennenbewegungen. Infolgedessen resultieren mehrfach Cycle-Slips (rote Linien). Diese treten an einigen Positionen bei allen Satelliten nahezu gleichzeitig auf. Es handelt sich dabei meist um Brückendurchfahrten.

In den folgenden zwei Abbildungen 4.10 und 4.11 wird die praktische Auswirkung einer reduzierten GNSS Anzahl verdeutlicht. Der Vergleich zeigt, wie zu erwarten, einen durchwegs signifikanten Anstieg der DOP-Parameter (siehe Tabelle 4.2) bei Nutzung von lediglich einem GNSS (konkret GPS). Speziell bei eingeschränkter Sichtbarkeit ändern sich die Werte sprunghaft auf das bis zu 4-Fache.

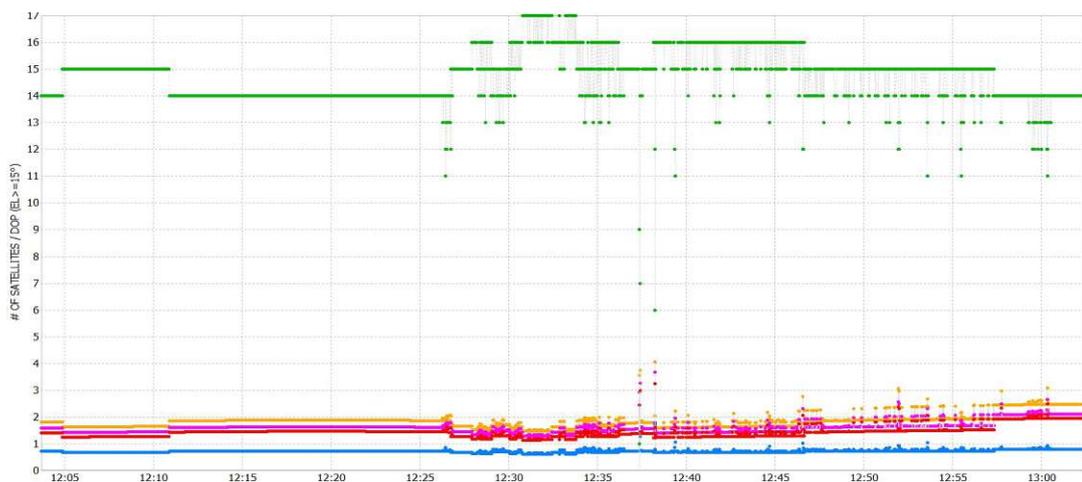


Abbildung 4.10: Satellitenanzahl GDOP PDOP HDOP VDOP (GPS & GLONASS)  
15. März 2018 12:04–13:03 UTC, Testfahrt Amstetten/St.Valentin; [RTKLIB, 2019]

Vereinzelt können keine 4 Satelliten synchron beobachtet werden, wodurch keine Positionierung möglich ist. Zudem besitzt die Strecke Amstetten/St.Valentin ein

geringes Abschattungspotential<sup>12</sup>, wodurch die Anzahl an sichtbaren Satelliten als eher überdurchschnittlich zu bewerten ist. Für präzise kinematische Messungen ist somit der Empfang von mehreren GNSS unentbehrlich.

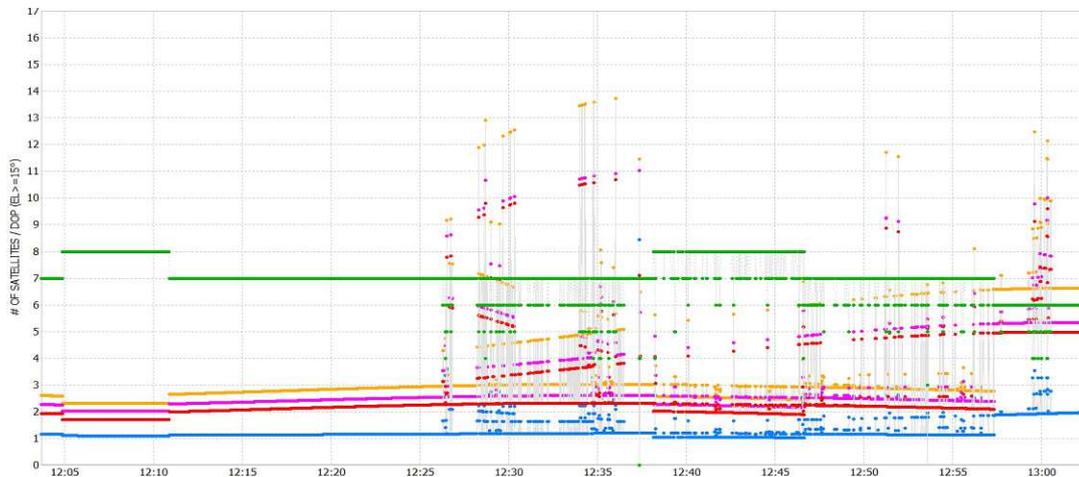


Abbildung 4.11: Satellitenanzahl GDOP PDOP HDOP VDOP (nur GPS)  
15. März 2018 12:04–13:03 UTC, Testfahrt Amstetten/St.Valentin; [RTKLIB, 2019]

GNSS	GDOP	PDOP	HDOP	VDOP
GPS & GLONASS	1.8	1.6	0.7	1.4
GPS	3.4	2.9	1.3	2.6

Tabelle 4.2: arithmetisches Mittel der DOP-Parameter aus Abbildung 4.10 und 4.11  
15. März 2018 12:04–13:03 UTC, Testfahrt Amstetten/St.Valentin; [RTKLIB, 2019]

## Sichtbarkeitsanalyse

Schließlich sei erwähnt, dass die Abschattung a priori mittels Sichtbarkeitsanalysen berücksichtigt werden kann. Diese können mit leistungsfähigen Geoinformationssystem Produkten wie ArcGIS durchgeführt werden. Dafür sind lokale Informationen der Hindernisse in Form eines digitalen Höhenmodells (DHM) im Umkreis des Empfängers notwendig. Das geeignetste DHM ist ein digitales Oberflächenmodell (DOM). Es stellt die genäherte Erdoberfläche samt allen darauf befindlichen natürlichen und künstlichen Objekten dar. Dabei ist die Höhe als Funktion der Lagekoordinaten zu verstehen. Sie ist somit im Fall von Brücken oder Überhängen kritisch zu betrachten.

Grundsätzlich sollte eine gewisse Skepsis bei DOM-Genauigkeits-Angaben bestehen. Wird nur eine Teilfläche mit einer z. B. 0.5 m-Auflösung aufgenommen und der Rest interpoliert, wirbt der DOM-Anbieter inkorrekterweise oft mit einer allgemeinen

<sup>12</sup>topografisch flach, streckenangrenzend größtenteils flache Vegetation (Felder), geringe Baudichte

0.5 m-Auflösung. Weiters sind bei einem DOM je nach Aufnahmemethodik (Laserscan, Image Matching) viele Objekte<sup>13</sup> mit Skepsis zu betrachten. Lokaler (variabler) Bewuchs ist durch solche Modelle nicht erfassbar und stellt ein generelles Problem dar. Ferner ist Vorsicht bei den Begriffen DHM, DOM und digitales Geländemodell (DGM) sowie den englischen Bezeichnungen digital elevation model (DEM), digital surface model (DSM) und digital terrain model (DTM) geboten. Sie werden in der Literatur fälschlicherweise häufig synonym verwendet.

Für Österreich können DOM auf den Portalen der einzelnen Bundesländer in variablen Auflösungen abgerufen werden. Die meisten Bundesländer bieten z. B. einen kostenfreien Datensatz in reduzierter Auflösung (10 m) an, ein hochauflösendes DOM (0.5 m) kann schließlich gegen Entgelt erworben werden. Ein landesweites DOM kann beim BEV, in einer Auflösung von 0.5 m, erworben werden (Preis/km<sup>2</sup>). Die Höhengenaugigkeit beträgt  $\pm 1$  m. Größere Abweichungen können bei Bewuchs sowie an Gebäuderändern und im Hochgebirge auftreten. Aktualisiert wird das gesamte Bundesgebiet innerhalb von 3 Jahren [BEV, 2019].

Globale Modelle, wie das frei verfügbare ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 (GDEM2), liefern eine Auflösung von 30 m zwischen 83° Nord und 83° Süd. Ähnlich, aber mit geringerer Abdeckung, verhält sich das DEM der Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Beide Modelle liefern somit eine weitaus geringere Auflösung und Genauigkeit und sind für die hier beabsichtigten Zwecke unbrauchbar. Kann aus diversen Gründen auf kein regionales DOM zugegriffen werden, sind globale Modelle eine notdürftige Alternative.

Die DOP-Parameter liefern eine Prognose der optimalen Beobachtungszeit, während eine Sichtbarkeitsanalyse den idealen Beobachtungsraum ermittelt. Dieser Raum ist durch die Gleiskörper bereits gegeben, dennoch können Sichtbarkeitsanalysen für Simulationen dienlich sein.

## 4.5 Arbeitsgeschwindigkeit & Messfrequenz

Der Datenblattauszug aus Tabelle 2.2 spiegelt die technischen Daten und die Leistungsbeschreibung moderner Bettungsreinigungsmaschinen wider. Hier wird eine Arbeitsgeschwindigkeit von 700 m/h angeführt. Diese Geschwindigkeit variiert, je nach Baureihe sowie verschiedenen Leistungsparametern, primär anhand der Räumbreite und der Reinigungstiefe. Infolgedessen kann die Arbeitsgeschwindigkeit durchaus auf unter 200 m/h sinken.

<sup>13</sup>z. B. Hochspannungsleitungen, Masten, Glas- und Wasserflächen, Fahrzeuge, Windräder, etc.

Referenznetzbetreiber übertragen in der Regel den Korrekturdatenstrom mit einer Frequenz von 1 Hz. In diesem Intervall beträgt die zurückgelegte Strecke von Bettungsreinigungsmaschinen, abhängig von ihrer Vortriebsgeschwindigkeit, rund 5–20 cm. Aus vorwiegend zwei Gründen kann sich die Strecke zwischen einem Aktualisierungsintervall jedoch deutlich erhöhen. Zum einen ist der Korrekturdatenempfang empfangen- sowie betreiberseitig nicht zur Gänze garantiert. Die Aktualisierungsintervalle können dadurch vereinzelt auf einige Sekunden anwachsen. Im Falle einer eigenen Referenzstation ist dieser Umstand irrelevant, da die Frequenz des Korrekturdatenstroms und der Datenaufzeichnung auf bis zu 20 Hz<sup>14</sup> erhöht werden kann. Die Strecke zwischen den Aktualisierungen würde nur noch 2.5–10 mm betragen. Die zweite gravierendere Ursache ist die in Kapitel 4.4 besprochene Abschattung. Hier hilft die Erhöhung der Frequenz bedingt. Im Falle von längeren kontinuierlichen Abschattungen wie Brücken ist eine Frequenz-Erhöhung vergebens. Wird der Raum, in welchem Signale empfangen werden können, vergrößert, können diese Abschattungseffekte reduziert werden. Explizit bedeutet dies eine Erhöhung der Antennenanzahl in einem definierten Raum mit bekannten Vektoren zwischen den Antennen. Die durch die synchrone Datenaufzeichnung erzeugte homogene Redundanz reduziert ebenfalls das zufällige Ausfallrisiko und stützt die Messergebnisse.

### Exkurs: Sensorfusion

Um dem Erfordernis einer kontinuierlichen Navigation nun zwischen den Aktualisierungsperioden nachzukommen, ist eine Integration von zusätzlichen hochfrequenten Informationen durch weitere Sensoren (Sensorfusion) obligat. Eine synergistische und bekannte Option ist z. B. die Integration von GNSS-Beobachtungen mit einem inertialen Navigationssystem (engl. Inertial Navigation System, INS).

Das Prinzip des INS entspricht dem Verfahren der Koppelnavigation. Hierbei werden fortlaufend die Bewegungsrichtung, die Geschwindigkeit und die seit der letzten Positionsbestimmung vergangene Zeit bestimmt (Update-Raten  $> 500$  Hz). Aus diesen Größen kann nun jeweils die Position relativ zu einem Startpunkt eindeutig berechnet werden. Die Messwerte ( $3 \times$  Winkelgeschwindigkeit und  $3 \times$  Beschleunigung) werden durch (mindestens) drei orthogonal angeordnete Drehratensensoren und Beschleunigungssensoren generiert. Die einfache Integration der Beschleunigung über die Zeit liefert die Geschwindigkeit und die zweifache Integration die zurückgelegte Wegstrecke. Die Integration der Winkelgeschwindigkeit ergibt den Verkipfungswinkel im inertialen Raum.

---

<sup>14</sup>bezogen auf die in dieser Arbeit verwendeten Antennen

Wesentlich für die Qualität eines INS ist der unvermeidliche kumulative Drift ( $^{\circ}/h$ ) der Sensoren. Dieser Drift ist durch die Unvollkommenheit der Fertigung bedingt. Das Spektrum der Güte reicht von wenigen Milligrad/h bis zu  $100^{\circ}/h$ , welches sich in den Anschaffungskosten widerspiegelt. Der systematische Fehler ist somit bei einem INS sehr hoch, der hochfrequente Fehler wiederum sehr klein. Bei GNSS-Fehlern ist dies exakt konträr, wodurch diese Sensorfusion eine sehr geeignete ist. Derartige Sensorfusionen werden in der Regel durch ein Kalman-Filter realisiert, wobei hier verschiedene Ansätze von lose gekoppelter bis eng gekoppelter Integration vorhanden sind. Diesbezüglich ist reichlich Literatur vorhanden, so auch in Kaplan & Hegarty [2017] und Teunissen & Montenbruck [2017]. Als Quintessenz soll mitgenommen werden, dass durch eine Sensorfusion eine verlässlichere und genauere Bestimmung von Positionen erreichbar ist, als es mit den einzelnen Systemen möglich wäre.

### **Geschwindigkeiten abseits der Schotterbettreinigungsmaschine**

Maschinen außerhalb des Bereichs der Bettungsreinigung, wie z. B. die elektronischen Messtriebe (EM) von Plasser & Theurer, erreichen Geschwindigkeiten von bis zu  $160 \text{ km/h}$ . Diese Maschinen dienen ausschließlich zur Datenaufnahme. Eine eigene Referenzantenne ist daher, aufgrund der in wenigen Minuten entstehenden zu langen Basislinien, absolut ungeeignet. Ist daher zukünftig ein System gewünscht, welches bei hohen Geschwindigkeiten präzise Echtzeit-Positionen erstellen soll, kann dies aktuell nur mit Netz-RTK bzw. mit kommerziellen PPP-Services (reduzierte Genauigkeit gegenüber RTK) erfolgen. Hier ist die Limitation jedoch das (im Idealfall)  $1 \text{ Hz}$  Aktualisierungsintervall. Bei einer Höchstgeschwindigkeit von  $160 \text{ km/h}$  würde sich die Maschine um mehr als  $44 \text{ m/s}$  bewegen.

## 5 Praxis

Die Wiederholgenauigkeit der EPOSA Netz-RTK Lösung und einer lokalen RTK Lösung wird nun anhand zweier verschiedener Messsysteme geprüft. Zum einen wird das Messsystem des Trägerfahrzeugs EM100VT (**Elektronischer Messtriebwagen 100 Virtual Track**) von Plasser & Theurer genutzt (siehe Abbildung 5.1).

Zum anderen wurden an der *Technischen Universität Wien* (TU Wien) anhand eines weiteren mobilen Messsystems Tests bezüglich EPOSA sowie auch zur lokalen RTK-Methode durchgeführt. Das System wurde im Zuge dieser Arbeit eigenverantwortlich konstruiert wie auch umgesetzt und simuliert ein langsam bewegtes Schienenfahrzeug. In Anlehnung an den EM100VT wurde die Simulation mit ZusiVT (**Zugsimulation Virtual Track**) betitelt.



Abbildung 5.1: Plasser & Theurer Messtriebwagen EM100VT [Plasser & Theurer, 2019]

## 5.1 System EM100VT

Grundsätzlich dient der EM100VT zur ganzheitlichen Erfassung des Gleiskörpers und des ihn umgebenden Raumes. Er erzeugt eine qualitative und umfangreiche Datengrundlage, welche die Erneuerung der Schienenverkehrsinfrastruktur vereinfachen soll. Der EM100VT verfügt neben Komponenten zur GNSS-Positionierung auch über Laserprofilsensoren<sup>1</sup>. Die prinzipielle Überlegung ist, mithilfe der Laserprofilsensoren und der GNSS-Messungen, eine GNSS-Position auf dem Gleiskörper bzw. die Gleisachse zu bestimmen. Nachfolgend werden die verwendeten Komponenten kurz vorgestellt.

### 5.1.1 Komponenten

#### GNSS Empfänger: JAVAD SIGMA

Der Empfänger ist das Herzstück des Systems. Verwendet wird der Multi-GNSS Empfänger SIGMA (bereits in Kapitel 4.2.2 erwähnt) des Unternehmens JAVAD GNSS, Inc (siehe Abbildung 5.2). Grundsätzlich handelt es sich um ein wasserfestes (IP 67) Aluminiumgehäuse mit diversen Anschlussmöglichkeiten, in der standardmäßig ein Multi-GNSS-Empfänger, zwei Lithium-Ionen-Akkus (7.4 V, 4.4 Ah), ein GSM/UMTS<sup>2</sup>-Modem und ein VHF/UHF-Modul verbaut sind. Je nach Bedarf kann diese Konfiguration erweitert und durch verschiedene OEM (Original Equipment Manufacturer)-GNSS-Empfängerplatinen angepasst werden [JAVAD, 2019].



Abbildung 5.2: JAVAD SIGMA [JAVAD, 2019]

#### OEM-Empfänger: Quattro-G3D

Der Quattro-G3D-Empfänger ist eine 100×120 mm Platine und ist im SIGMA verbaut. Er besitzt vier Eingänge, um mit bis zu vier Antennen zeitgleich Daten auf-

<sup>1</sup>Ferner befinden einige weitere, jedoch für diese Arbeit, irrelevante Messsysteme am EM100VT

<sup>2</sup>UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), Mobilfunkstandard der 3. Generation

zunehmen. Diese Eingänge sind gegliedert in einen Hauptempfänger (Master) und drei Nebenempfänger. Ein Vorteil dieser Anordnung ist die Berechnung dreier Vektoren zur Hauptantenne, um dadurch die räumliche Orientierung eines Objektes zu bestimmen. Für RTK- und Standalone-Anwendungen dient die Hauptantenne.

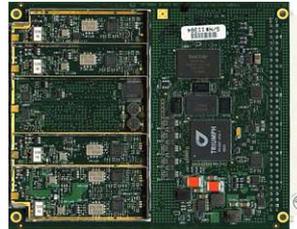


Abbildung 5.3: Quattro-G3D [JAVAD, 2019]

Der Quattro-G3D besitzt insgesamt 216 Kanäle. Beobachtet werden können die Signale von GPS (L1,L2), GLONASS (L1,L2), Galileo (E1), BeiDou sowie WAAS und EGNOS. Möglich sind Aktualisierungsraten bis zu 100 Hz für Rohdaten und bis zu 20 Hz für RTK-Positionierungen. Kommuniziert wird in den Formaten RTCM SC-104 2.x und 3.x sowie NMEA 0183 2.x und 3.0 [JAVAD, 2019].

### GNSS Antenne: JAVAD GrAnt G3T

Die G3T Antenne wurde konzipiert, um Frequenzen im unteren (1164–1254 MHz) und mittleren (1551–1614 MHz) L-Band empfangen zu können. Dadurch kann ein Großteil der aktuellen GNSS-Signale empfangen werden (siehe Tabelle 5.1) [JAVAD, 2019]. Insgesamt sind 4 Stück in genäherter Rechteckgeometrie am Dach des EM100VT montiert (siehe Abbildung 5.4). Sie sind deklariert als Antennen A ( $\hat{=}$  Master), B, C und D, ersichtlich in Abbildung 5.5 [JAVAD, 2019].



Abbildung 5.4: 4 Stück G3T montiert am EM100VT; [JAVAD, 2019], [Plasser & Theurer, 2019]

GPS:	L1 L2 L2C L5	GLONASS:	L1 L2 L3
GALILEO:	E1 E2 E5ab	BEIDOU:	B1 B2
QZSS:	L1 L2 L2C L5	SBAS:	WAAS L1 L5, EGNOS, MSAS, GAGAN

Tabelle 5.1: Empfangbare Frequenzbänder der G3T Antenne

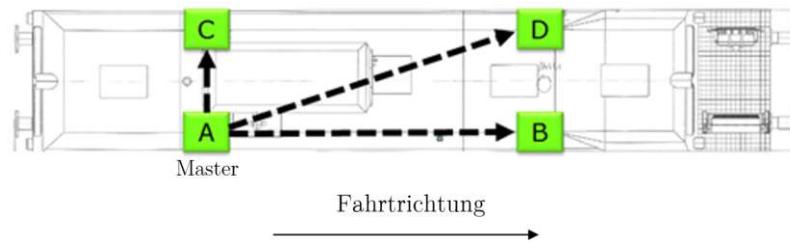


Abbildung 5.5: Anordnung der 4 Antennen am EM100VT; [JAVAD, 2019]

### Laserprofilsensor: Gocator 2350

Der 3D-Laserprofilsensor Gocator 2350 von LMI-Technologies (siehe Abbildung 5.6) ermöglicht eine hochfrequente Erfassung von nahen Objekten im Mikrometerbereich (siehe Tabelle 5.2) [LMI, 2019]. An der Unterseite des EM100VT sind insgesamt  $2 \times 2$  Stück (2 vorne, 2 hinten) montiert. Sie erfassen die Position der sogenannten Spurkranzauflagepunkte. Diese Punkte definieren die Normalspurweite und sind insofern die zu bestimmenden Punkte [LMI, 2019].

Auflösung (Z-Richtung):	19–60 $\mu\text{m}$	Messfrequenz:	170–5000 Hz
Wiederholbarkeit:	2 $\mu\text{m}$	Messbereich:	30–70 cm

Tabelle 5.2: Eckdaten: Gocator 2350; [LMI, 2019]

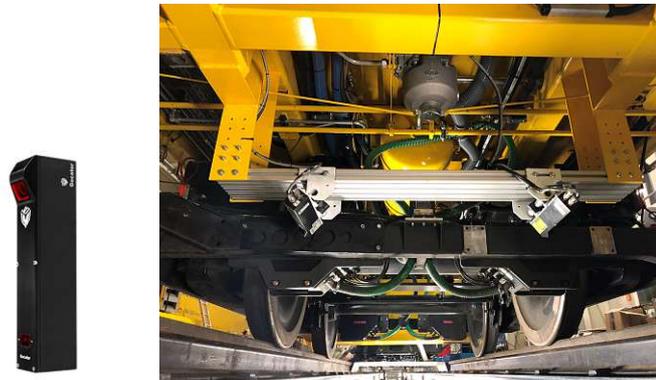


Abbildung 5.6: 4 Stück Gocator montiert am EM100VT; [LMI, 2019], [Plasser &amp; Theurer, 2019]

### 5.1.2 Trajektorie & Datenaufzeichnung

Die Messfahrten wurden auf der Nordbahn (Abschnitt Angern/Dürnkrot) nordöstlich von Wien nahe der slowakischen Grenze durchgeführt (siehe 5.7). Die Strecke beinhaltet mehrere Brücken, dicht bewaldete Abschnitte sowie freie Flächen. Es erfolgten insgesamt 12 Messfahrten, wobei 3 davon am 24. Juli 2019 und 9 am darauffolgenden Tag stattfanden. Sämtliche Fahrten erfolgten am selben Gleiskörper. Bei

der Hälfte der Fahrten bewegte sich der EM100VT von Angern Richtung Dürnkrut, bei den restlichen 6 Fahrten in die entgegengesetzte Richtung.

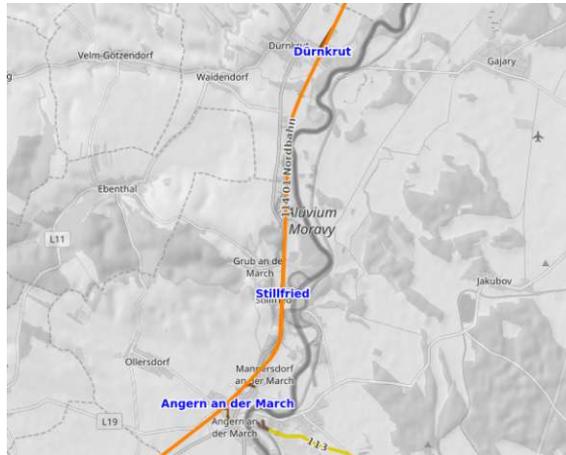


Abbildung 5.7: Messgebiet; [OpenRailwayMap, 2019]

### Daten der Gocator-Laserprofilsensoren-Messung

Mithilfe der Laserprofilsensoren wurden die Positionen der Spurkranzauflegepunkte für die linke und die rechte Schiene sowie ein zugehöriger UTC-Zeitstempel und die zurückgelegte Strecke erfasst. Jeweils ein Sensorpaar bildet dabei ein gemeinsames Koordinatensystem ( $\cong$  Objektsystem vorne und Objektsystem hinten). Es orientiert sich am Gleiskoordinatensystem der Euro Norm. Diese Koordinaten im Objektsystem werden fortan mit  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$  bezeichnet. Die  $x'$ -Achse zeigt immer in Fahrtrichtung. Die Messebene liegt in der  $y'z'$ -Ebene, weshalb die  $x'$ -Koordinate stets Null beträgt. Die  $z'$ -Achse zeigt nach unten und die  $y'$ -Achse komplettiert ein rechtshändiges System. Die  $y'$ -Koordinate des linken Spurkranzauflegepunktes ist negativ und jenes des rechten positiv (siehe Abbildung 5.8).

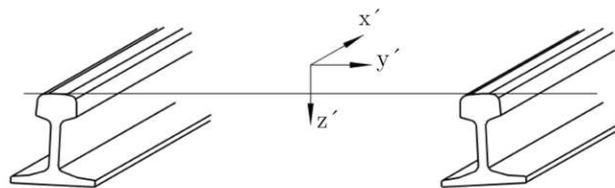


Abbildung 5.8: Koordinatensystem der Gocator-Messung

Die Datenaufnahme erfolgte alle 25 cm. Durch die variable Geschwindigkeit des Zuges (bis zu 100 km/h) ist dementsprechend die Messfrequenz variabel. Die folgende Tabelle 5.3 zeigt einen Auszug der durch die Laserprofilsensoren generierten Messdaten:

Zeit (UTC)	gültig	Distanz [m]	$x'$ [m]	$y'$ [m]	$z'$ [m]
07:23:14.249	1	4.498	0	-0.712095916	0.017380597
07:23:14.359	1	4.747	0	-0.711926818	0.017080426
07:23:14.467	1	4.997	0	-0.711424828	0.0174322147

Tabelle 5.3: Auszug der Gocator-Messdaten (linke Schiene)

Der Indikator „gültig“ gibt an, ob die Messung vollzogen wurde bzw. ob Koordinaten berechnet werden konnten. Ist die Messung ungültig ( $\hat{=}$  0), liegen keine Koordinaten, sondern nur Zeitstempel und Distanz vor. Im Falle der Gocator-Messungen liegt die Anzahl der gültigen Messungen bei nahezu 100 %.

### Daten der GNSS-Messung

Die vier Antennen (A, B, C, D; siehe Abbildung 5.5) zeichnen simultan Daten im Abstand von 1 Hz auf (Distanz variabel). Analog zu den Gocator-Messungen werden ein zugehöriger UTC-Zeitstempel und die zurückgelegte Strecke erfasst. Die Positionsbestimmung erfolgte durch EPOSA Netz-RTK (ITRF2014 zur Epoche 2010). Die ITRF-Koordinaten werden nachfolgend mit  $x, y, z$  deklariert. Einen Auszug der GNSS-Messdaten (exklusive der Koordinaten der Antennen B, C und D) zeigt Tabelle 5.4:

Zeit (UTC)	gültig	Distanz [m]	$x$ [m] (Ant. A)	$y$ [m] (Ant. A)	$z$ [m] (Ant. A)
07:23:14	1	3.961	4061624.861	1228958.753	4745967.742
07:23:15	1	6.365	4061623.125	1228959.958	4745968.875
07:23:16	1	9.430	4061620.914	1228961.501	4745970.325

Tabelle 5.4: Auszug der GNSS-Messdaten, ITRF

### Eckdaten einer durchschnittlichen Messfahrt

Die Werte im folgenden Absatz ergeben sich aus dem arithmetischen Mittel sämtlicher Messfahrten. Sie dienen als Eckdaten bzw. zum Verständnis des Umfangs einer Fahrt und weisen auch auf die Diskontinuität der GNSS-Datenaufnahme hin.

Die Dauer einer mittleren Messfahrt beträgt knapp 7 Minuten. Der EM100VT bewegte sich dabei während der Fahrt mit Geschwindigkeiten zwischen 2–102 km/h. Die Test-Streckenlänge von fast 9 km liefert rund 35700 Gocator-Messungen pro Sensor.

Aus der Dauer der Messfahrt ergibt sich eine maximal mögliche GNSS-Datenaufnahme von 418 Einträgen pro Antenne. Die eigentliche GNSS-Datenaufnahme be-

trägt lediglich 5.5 Minuten. Denkbare Grund für die unvollkommene Datenaufnahme ist die Abschattung durch Brücken und Bewuchs. Folglich sinkt die Anzahl signifikant auf 328 Einträge. Von diesen aufgezeichneten Daten wiederum liegt die Anzahl der gültigen Messungen bei 95.3 %. Dies ergibt letztlich 314 gültige Messungen.

Die folgende Abbildung 5.9 zeigt (repräsentativ für alle Messfahrten) die gültigen GNSS-Messungen im Abstand von 1 Hz (blaue Marker). Klar zu erkennen sind die fehlenden Aufnahmen nach einer Brückendurchfahrt. Die Ursache der nächsten Unterbrechung ist eine vermeintliche Abschattung durch lokalen Bewuchs.



Abbildung 5.9: Diskontinuierliche Messung infolge von Abschattungen  
(erstellt mit Google Earth Pro 7.3.2.5776)

### Definition der Genauigkeit

Vor dem Kapitel „Auswertung“ sei die hierfür wichtige Definition von Genauigkeit anhand der Begriffe *Richtigkeit* und *Präzision* nach Prenesti & Gosmaro [2015] erwähnt.

*Richtigkeit* ist der qualitative Ausdruck für die Übereinstimmung zwischen dem erwarteten Wert (z. B. arithmetisches Mittel) und einem akzeptierten Referenzwert<sup>3</sup>. Die Richtigkeit kann als systematischer Fehleranteil interpretiert und anhand der Differenz von einem berechneten Mittelwert und einem Referenzwert beurteilt werden.

*Präzision* (auch Wiederholgenauigkeit) hingegen ist der qualitative Ausdruck für die Übereinstimmung zwischen den einzelnen wiederholten Messergebnissen. Sie hängt

<sup>3</sup>Der wahre Wert einer Messung ist stets unbekannt, wodurch in der Praxis ein akzeptierter Referenzwert verwendet werden muss.

nur von der Verteilung der zufälligen Fehler ab, bezieht sich nicht auf einen wahren Wert oder einen akzeptierten Referenzwert und wird durch eine Streumaß (im Allgemeinen durch die Standardabweichung) ausgedrückt.

Als *Genauigkeit* wird nun die Kombination dieser zwei Kriterien verstanden. Sie inkludiert dementsprechend den gesamten (systematischen und zufälligen) Messfehler.

### 5.1.3 Methodik der Auswertung

Um die gesuchten Punkte  $P'$  (Spurkranzauflagepunkte im Objektsystem) im GNSS-System zu bestimmen, ist es notwendig, die beiden Systeme (Objektsystem O und GNSS-System G) zu kombinieren. Dies gelingt mithilfe einer 7-Parameter Transformation (bzw. 6-Parameter Transformation, da der Maßstab mit 1 fixiert wird), siehe (5.1).

$$P = R_O^G \cdot P' + T_G \quad (5.1)$$

Die Transformationsparameter (Rotationsmatrix  $R_O^G$  und Translationsvektor  $T_G$ ) werden zu jeder Epoche über die 4 Antennen (Identpunkte) bestimmt. Dafür ist die Kenntnis der Antennenpositionen in beiden Systemen notwendig. Die Positionen der Antennen im ITRF sind das Ergebnis der GNSS-Messung. Sie ändern sich durch die Bewegung permanent. Die Koordinaten  $x', y', z'$  der Antennen im Objektsystem sind stabil und wurden durch eine Kalibrierung relativ zum jeweiligen Sensorpaar vorab festgelegt. Die Kalibrierung des hinteren Sensorpaares verlief leider fehlerhaft. Für die Auswertung kann deshalb nur das vordere Paar verwendet werden. Die folgende Tabelle 5.5 zeigt die Ergebnisse der Kalibrierung ( $x', y', z'$  der vier Antennen).

Antenne	$x'$ [m]	$y'$ [m]	$z'$ [m]
A	-5.8591	0.9426	-3.9058
B	0.1469	0.9741	-3.9095
C	-5.8472	-1.0612	-3.8881
D	0.1512	-1.0367	-3.8962

Tabelle 5.5: Ergebnisse der Kalibrierung

Dieser grundlegende Ablauf wird durch eine schematische Darstellung anhand des nachstehenden Blockdiagramms verdeutlicht (siehe Abbildung 5.10).

Um eine Aussage über die Genauigkeit zu erhalten, ist es nötig, die Daten mit einer Referenz zu vergleichen. Eine absolute Referenz mit übergeordneter Genauigkeit (z. B. durch terrestrische Vermessung) ist nicht vorhanden, weshalb nur ein relati-

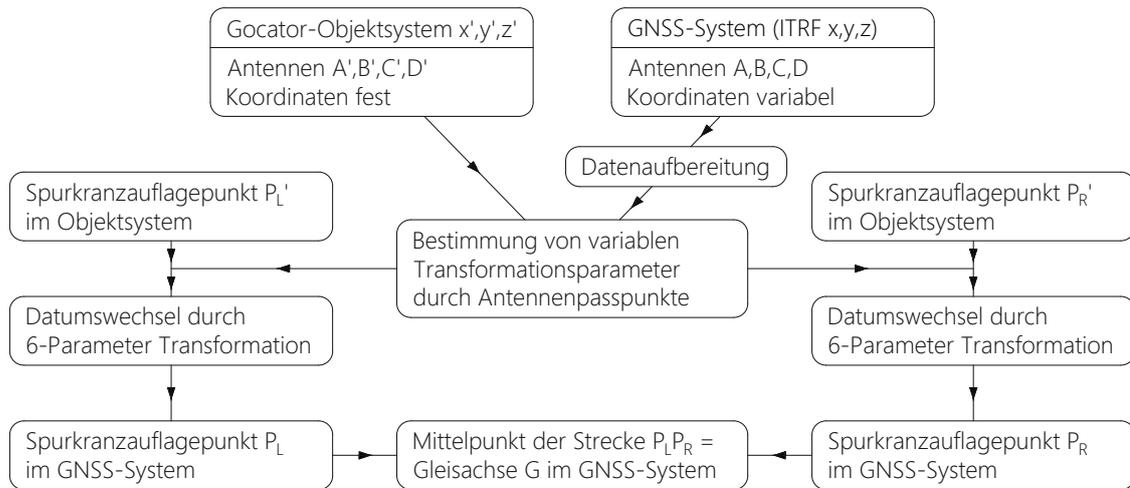


Abbildung 5.10: Überführung der Gleisachse in das ITRF

Der Vergleich zwischen den einzelnen Fahrten erfolgen kann. Da die Messfahrten zwangsläufig hintereinander erfolgten und somit kein gegenseitiger zeitlicher Bezug vorhanden ist, wird das Verfahren der Fixpunktmessung (FPM) angewandt. Hierbei wurde während des Passierens von zwei ausgewählten Punkten (Beginn und Ende der Fahrt) die Zeit präzise festgehalten. Werden nun die Koordinaten (GNSS- und Gocatorkoordinaten) und die Gocator-Streckenmessung (hochfrequenter) auf die Zeit der FPM interpoliert, ist ein gegenseitiger Bezug vorhanden. Dieser Vorgang, sowie das Entfernen von ungültigen Messungen, erfolgt im Schritt „Datenaufbereitung“ (siehe Abbildung 5.10 und 5.11).

Würden die Ergebnisse nun ausschließlich aus berechneten Gleisachsen bewertet werden, könnten Rückschlüsse auf die GNSS-Messung nur bedingt erfolgen, da eine Beeinflussung durch die 6-Parameter-Transformation gegeben ist. Infolgedessen ist es nicht zweckmäßig, Aussagen anhand der berechneten Spurkranzpunkte bzw. der Gleisachse zu treffen, weshalb der Ablauf 5.10 in zwei Bereiche aufgegliedert wird.

In einem ersten Abschnitt erfolgt ein Vergleich der Antennen-Positionen im GNSS-System. Hier können unmittelbar Qualität und Genauigkeit der kinematischen RTK-GNSS-Positionierung abgeleitet werden. In einem zweiten Schritt wird die Korrelation zwischen Antennengeometrie und Transformation sowie deren Auswirkung untersucht.

### Auswertung 1: Vergleich der Antennen-Positionen im GNSS-System

Einen Einstieg und Überblick liefert folgendes Blockdiagramm 5.11. Zu Beginn erfolgt die bereits erwähnte Datenaufbereitung. Anschließend erfolgt eine Auswahl der

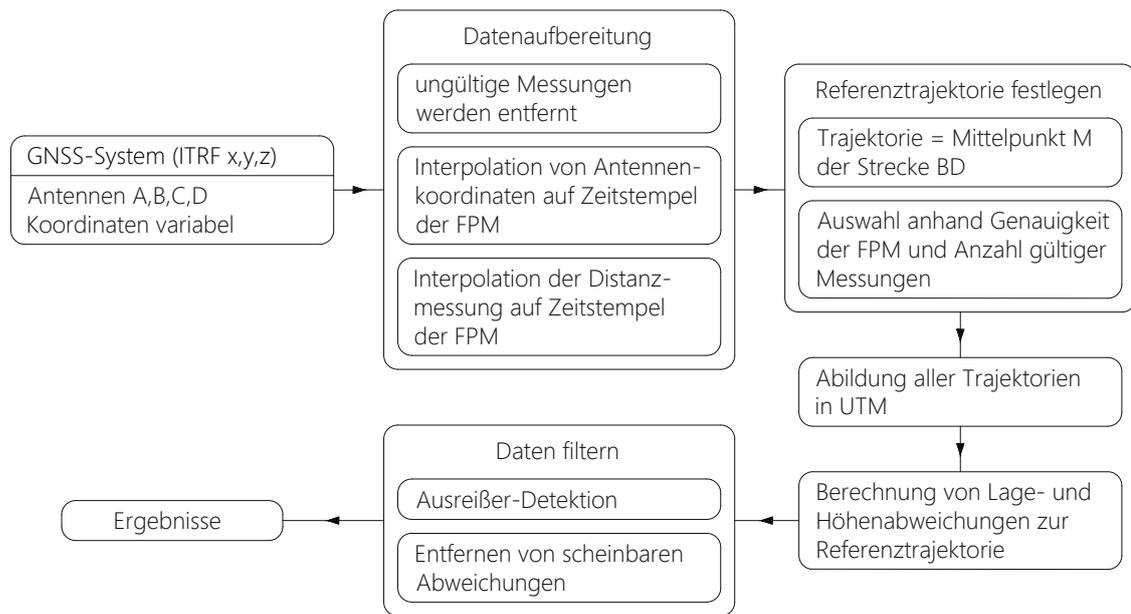


Abbildung 5.11: Ablauf für Erhalt von vergleichbaren GNSS-Positionen

Fahrten hinsichtlich ihrer Qualität sowie die Festlegung einer Referenztrajektorie, wobei als Trajektorie der Mittelpunkt M der Strecke  $[BD]^4$  definiert wurde.

Die Trajektorien wurde anhand 4 hierarchischer Kriterien ausgewählt. Die Kriterien 1–3 beziehen sich dabei auf die Qualität der Fixpunktmessung. Die Referenz wurde mit dem 4. Kriterium fixiert.

i Kriterium: Extrapolation notwendig?

Bei 3 von 12 Messfahrten (Fahrt 2, 9 und 12) liegt mindestens ein Zeitstempel der FPM außerhalb des Zeitraumes der tatsächlichen Datenaufnahme. Dieser Zeitstempel müsste somit extrapoliert werden, wodurch die Koordinaten- und Distanzbestimmung zur Zeit der FPM nur sehr unsicher möglich wäre.

ii Kriterium: Wiederholbarkeit der Distanz zwischen der FPM

Erwartungsgemäß zeigten die Fahrten 2, 9 und 12 eine deutliche Abweichung (Ausreißer) von  $> 2$  m zum Median. Ebenfalls überschreitet Fahrt 1 diese Abweichung und wurde somit ebenfalls entfernt.

iii Kriterium: Wiederholbarkeit der Lage-Koordinaten der FPM

Aufgrund der Interpolation sowie der nicht gegebenen Redundanz einer einzelnen Messfahrt wurden Messfahrten erst bei verhältnismäßig großen Abwei-

<sup>4</sup>Dieser Punkt ist der Gleisachse G in der Lage am nächsten

chungen zum Median ( $> 15$  cm) als ungültig befunden. Auch hier wurden 2 weitere Fahrten (5 und 10) eruiert und ausgeschlossen.

iv Kriterium: Fehlerniveau, Anzahl der Messungen

Aus den verbleibenden 6 Fahrten wurde schließlich Fahrt 4 als geeignete Referenz<sup>5</sup> befunden. Sie zeigt das homogenste Fehlerniveau (Abweichungen zwischen den Fahrten) sowie eine hohe Anzahl verwendbarer Messungen (siehe anschließend „scheinbare Abweichung“ in Abbildung 5.12).

Nach der Referenzfestlegung werden sämtliche Trajektorien in das UTM-System abgebildet, um zwischen Lage- und Höhenabweichungen zu unterscheiden. Die eigentliche Berechnung der Abweichungen zur Referenz wird anhand von Abbildung 5.12 erläutert. Diese Abbildung zeigt Trajektorie<sub>REF</sub>, die gewählte Referenztrajektorie und Trajektorie<sub>i</sub>, welche stellvertretend für die restlichen 5 Trajektorien steht. Ein direkter Vergleich der Punkte  $P_{REF}$  und  $P_i$  (= totale Abweichung) ist nicht zweckmäßig, da durch die sukzessiven Messfahrten und die damit verbundenen Beschleunigungsdifferenzen, bei einer maximal gegenseitigen zeitlichen Differenz von 2 Sekunden, der Punktabstand auf  $> 13.9$  m anwachsen kann. Ein Punktvergleich von  $P_{REF}$  und einem auf die gleiche Distanz (theoretisch würden sich somit beide Punkte am selben Streckenkilometer befinden) interpolierten Punkt ist aufgrund der hohen Geschwindigkeit und der damit verbundenen Unsicherheit der Interpolation ebenfalls nicht aussagekräftig.

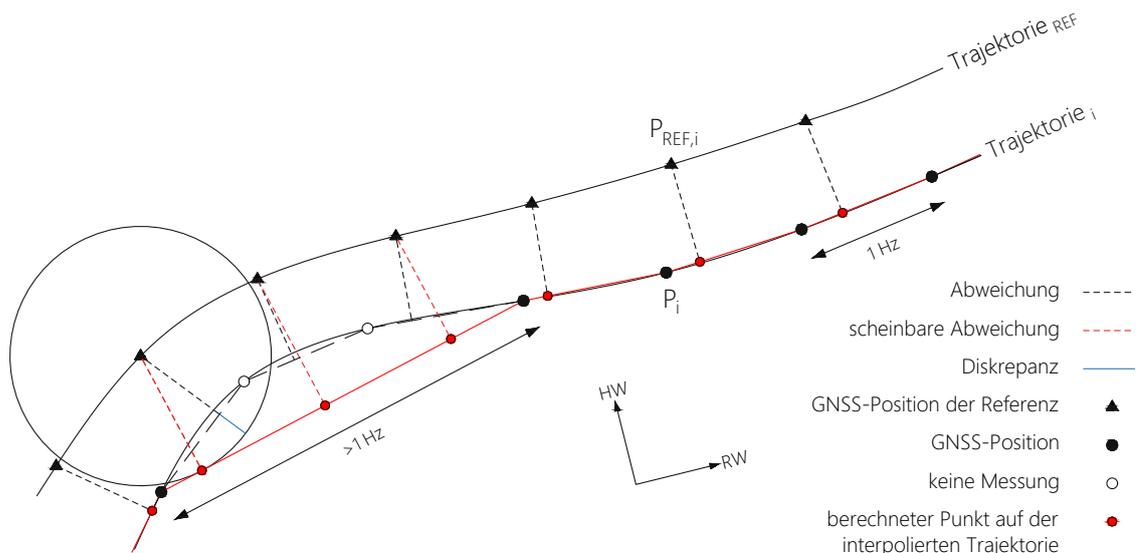


Abbildung 5.12: Berechnungsverfahren der 2D-Lage-Abweichungen

<sup>5</sup>1. Fahrt vom 25. Juli (07:23:11–07:29:32 UTC)

Aus diesem Grund wurden die Trajektorien linienhaft ausgewertet. Ausgehend von Trajektorie<sub>REF</sub> wird die kürzeste Verbindung (i. A. die Lotstrecke) zur linear<sup>6</sup> interpolierten Trajektorie<sub>i</sub> berechnet. Diese Strecke wird in der Folge als (minimale) Abweichung bezeichnet. Da aus vielfältigen Gründen (siehe Kapitel 4.4) nicht jede volle Sekunde eine Position bestimmt werden konnte, entstehen sogenannte scheinbare Abweichungen, welche zu sehr viel größeren, jedoch theoretischen Abweichungen (Abweichung + Diskrepanz) führen können. Für adäquate Aussagen bezüglich der erreichbaren Genauigkeiten werden somit die Daten dementsprechend gefiltert.

Die Datenlücken sind, speziell bei Fahrten in oppositioneller Fahrtrichtung zur Referenz, nicht konsistent. Um möglichst viele Daten beizubehalten, werden innerhalb der Datenlücken scheinbare Abweichungen von erwartbaren Größenordnungen ( $3 \text{ cm}^7$ ) nicht verworfen. Solche Abweichungen entstehen typischerweise bei Signalabbriss auf einer Geraden. Um mehr Punkte zu generieren und somit das Ergebnis zu festigen, werden zusätzliche Punkte zwischen den Referenzpunkten linear interpoliert. Als Höhendifferenz wird schließlich die Differenz zwischen  $P_{\text{REF}}$  und dem zugehörigen berechneten Punkt auf der interpolierten Trajektorie verstanden.

Angesichts der Ergebnis-Interpretation sei angemerkt, dass die hier angeführte Abweichung bezüglich der Referenz-Trajektorie stets die kürzeste Verbindung im euklidischen Raum darstellt und diese somit immer kleiner/gleich einer totalen Abweichung im Raum ist. Die hier berechnete Abweichung stellt somit eine idealisierte Abweichung dar.

## Auswertung 2: Antennengeometrie, Transformation und Positionsfehler

Erneut liefert ein Blockdiagramm (siehe Abbildung 5.13) einen Überblick der Auswertung.

Der Ablauf ist analog zu dem in Abbildung 5.10. Die Transformationsparameter werden zu jeder Epoche durch Verwendung aller 4 Antennenpasspunkte bestimmt. Jedoch werden nicht die im GNSS-System unbekanntenen Spurkranzauflagepunkte transformiert, sondern die Antennen  $B'$  und  $D'$ . Anschließend kann aus den transformierten Antennenpunkten  $B_T$  und  $D_T$  der Streckenmittelpunkt  $M_T$  berechnet und mit dem bekannten Soll-Mittelpunkt  $M$  gegenübergestellt werden.

Durch den Vergleich der Genauigkeiten der Transformationsparameter (welche die Antennengeometrie widerspiegeln) mit der Differenz  $dM = M - M_T$  (= Abweichung

<sup>6</sup>Prinzipiell ist auch z. B. die Spline-Interpolation geeignet. Diese erzielt allerdings keine nennenswert kleineren Abweichungen und benötigt eine deutlich längere Rechenzeit.

<sup>7</sup> $\hat{=}$  der  $2\sigma$  EPOSA-Lageabweichung

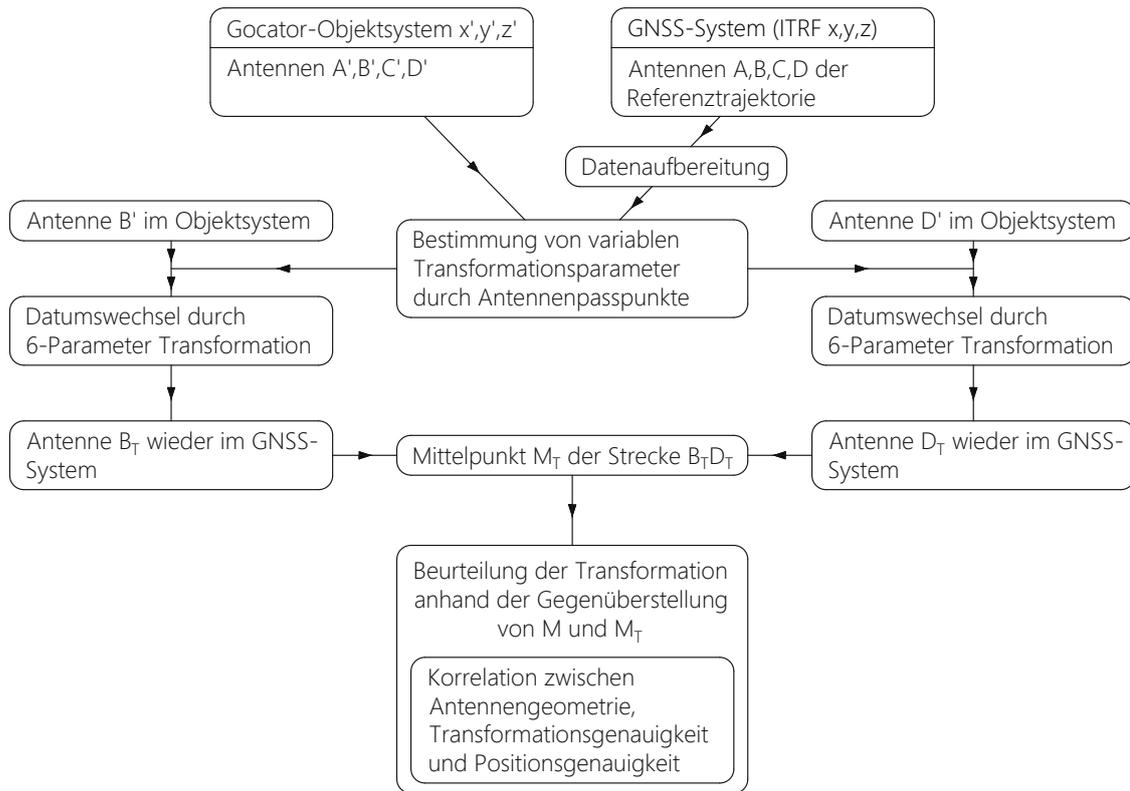


Abbildung 5.13: Ablauf zur Beurteilung der Transformationsgenauigkeit

des Sollpunktes  $M$ ) kann ein kausaler Zusammenhang zwischen Antennengeometrie, Transformationsgenauigkeit und daraus resultierender Positionsgenauigkeit hergestellt werden. Das Ergebnis soll primär Aussage über die Transformationsqualität liefern, weshalb nicht alle 6 Trajektorien, sondern ausschließlich die Referenztrajektorie verwendet wird. Die Ergebnisse der Auswertung werden in Kapitel 5.3.1 und 5.3.2 dargestellt.

Sämtliche Berechnungen erfolgten mit der kommerziellen, an der TU-Wien lizenzierten Software MATLAB, Version 9.7.0.1216025 (R2019b) Update 1.

## 5.2 System ZusiVT

Das System ZusiVT (siehe Abbildung 5.14) wurde primär für eine komfortable, autonome Datenaufnahme von kinematischen GNSS-Daten, explizit für die Arbeitsgeschwindigkeit von Schotterbettreinigungsmaschinen, entworfen. Das System besteht aus einer Aluminium-Trägerplattform (500×160 mm) mit zentraler 5/8 Zoll-Gewindeschraube (=Herzschraube), worauf ein Topcon-Dreifuss und der GNSS-Empfänger Spectra Precision SP80 (seit 2018 Spectra Geospatial) montiert ist. Die Plattform wird durch einen 18 V permanentenerregten Gleichstrommotor angetrieben. Er ist kombiniert mit einem Planetengetriebe, um die Drehzahl herabzusetzen und das Drehmoment zu erhöhen. Als Gleichstromquelle dient ein 18 V/1.3 Ah-Akku. Damit die Geschwindigkeit an eine Schotterbettreinigungsmaschine individuell angepasst werden kann, befindet sich zwischen Motor und Gleichstromquelle ein elektronischer Drehzahlregler. Dadurch kann die Geschwindigkeit stufenlos zwischen  $v_{\min} \approx 300$  m/h und  $v_{\max} \approx 1500$  m/h variiert werden.



Abbildung 5.14: ZusiVT

## 5.2.1 Komponenten

### GNSS-Antenne Spectra Precision SP80<sup>8</sup>

- Chipsatz mit 240 Kanälen
  - GPS L1C/A, L1P(Y), L2P(Y), L2C, L5
  - Glonass L1C/A, L2C/A
  - BeiDou B1 (Phase 2), B2
  - Galileo E1, E5a, E5b
  - SBAS (WAAS/EGNOS/MSAS/GAGAN) L1C/A
- bis zu 20 Hz Echtzeit-Rohdaten
  - Code und Trägerphase sowie Positionsausgabe
- 3.5G-Mobilfunkmodem, WLAN-/UHF-kommunikationsfähig
- unterstützt Trimble RTX Real-Time Korrekturdatenservice
- GNSS-zentrische Z-Blade-Technologie



Dies ist ein Ansatz, welcher keine inhärente Abhängigkeit von GPS-Signalen bildet, sondern beliebige Kombinationen von GNSS-Satellitensignalen zulässt, selbst ohne GPS-Satelliten. Dies steigert die Verfügbarkeit von RTK-Positionen in abgeschatteten Bereichen mit beschränkter Satellitensichtbarkeit. Bei Bedarf ist auch die Verwendung im reinen GPS-Modus, im reinen Glonass-Modus oder im reinen BeiDou-Modus möglich.

- Anbringung der UHF-Antenne im Stab

## 5.2.2 Trajektorie

Als Testgebiet wurde das Dach der TU Wien am Standort Gußhausstrasse 25–29 gewählt. Hier befindet sich allseitig ein Geländer, welches zum Teil als 36 m langes Schienenersatzstück bzw. als Trajektorie (siehe Abbildung 5.15) fungiert. Anhand dieser Referenz werden die Genauigkeiten bezüglich der GNSS Messungen abgeleitet. Es wird hingewiesen, dass die Trajektorie für den urbanen Bereich sehr günstig positioniert ist. Dank der Gebäudehöhe und überwiegend nördlicher Abschattungen besteht eine konstant gute Satellitensichtbarkeit.

Die Referenz wurde mit der Totalstation Leica Viva TS16 terrestrisch eingemessen. Somit kann, anders als bei der Auswertung der EM100VT-Daten (siehe Kapitel 5.1),

<sup>8</sup>[Spectra Geospatial, 2016]

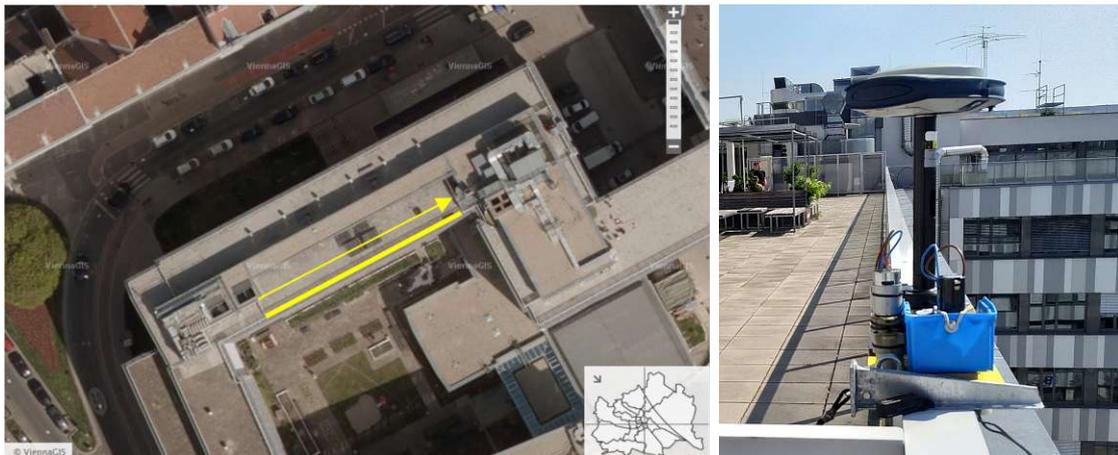


Abbildung 5.15: Referenztrajektorie, Länge: 36 m

über eine absolute Referenz verfügt werden. Um die Koordinaten-Spannungen im Landessystem als Fehlerquelle auszuschließen, wurde, wie bei der EM100VT Auswertung, das UTM-System für Koordinatenvergleiche gewählt. Die Pfeiler-Koordinaten liegen im ETRS89 vor und wurden vorab in das UTM System umgerechnet. Der Anfang und das Ende der Trajektorie wurden aus Gründen der Wiederholbarkeit durch orthogonal zur Trägerplattform fest fixierte metallene Stützen definiert. Statt der in Abbildung 5.14 gezeigten GNSS-Antenne wurde ein Präzisionsprisma angebracht. Aufgenommen wurden insgesamt 37 Punkte in einem Abstand von jeweils einem Meter. Anfang und Endpunkt wurden kontrolliert von einem 2. Pfeiler gemessen. Die tachymetrische Auswertung erfolgte mit der Software Geosi. Tabelle 5.6 zeigt die Koordinaten dieser 2 Punkte und deren Differenz. Die maximale Lageabweichung beträgt 1 mm, die maximale Höhenabweichung 3 mm. Für die restlichen 35 Punkte der Trajektorie kann daraus auf ein ähnliches Genauigkeitsniveau geschlossen werden. Die Trajektorie ist somit hinreichend adäquat, um eine Referenz für kinematische GNSS-Messungen zu repräsentieren.

	Punktnummer	Rechtswert [m]	Hochwert [m]	Höhe [m]
Messung 1	1	601752.670	5339001.102	244.424
	37	601784.066	5339018.678	244.388
Messung 2	1	601752.671	5339001.102	244.426
	37	601784.067	5339018.677	244.391
Differenz $\Delta$	1	-0.001	0.000	-0.002
	37	0.001	0.001	-0.003

Tabelle 5.6: Koordinaten der Referenztrajektorie; Anfang und Endpunkt

### 5.2.3 Konzept & Ausführung

Im Mittelpunkt steht eine Demonstration der zwei präzisesten GNSS Echtzeitanwendungen (Netz-RTK und Basis/Rover-RTK) in einem langsam bewegten Zustand. Diese Methoden wurden mit jeweils zwei Geschwindigkeiten ( $v_1 = 400$  m/h und  $v_2 = 1500$  m/h) ausgeführt:

Die 1. Messmethode, Netz-RTK (EPOSA), wurde am 24. Juni 2019, beginnend um ca. 14:00 UTC durchgeführt. Die Antenne wurde mit dem EPOSA-Datenstrom RTK-3-ETRF (RTCM 3.0, L1 + L2) verbunden und über eine halbe Stunde statisch am Startpunkt positioniert, um Information über das Konvergenzverhalten zu erhalten. Anschließend wurde auf den ersten Metern langsam auf 400 m/h beschleunigt. Dieser Vorgang wurde mit 1500 m/h wiederholt.

Die 2. Messmethode, Basis/Rover-RTK, wurde einen Tag später, am 25. Juni 2019, beginnend um ca. 10:00 UTC durchgeführt. Die Vorgehensweise der kinematischen Messung ist ident zur 1. Methode. Vorab wurde eine weitere SP80 Antenne an einem Messpfeiler positioniert, welche als Basis fungiert. Der statische Messvorgang wurde auf eine Stunde verlängert.

### 5.2.4 Auffälligkeiten

Die Antennen werden mittels Tablet-PC und eigener Software per Bluetooth bedient. Da die TU Wien nicht im Besitz der speziell für die SP80 Antenne angepassten Softwarepakete *Spectra Geospatial Survey Pro* oder *FAST Survey* ist, wird auf die alternative Software *Carlson SurvPC* zurückgegriffen. Carlson SurvPC ist ein vollständiges Datenerfassungssystem für RTK, GNSS-Rohdaten und Totalstationen. Leider trägt dies einige nachteilige Konsequenzen mit sich, welche mutmaßlich mit einer fehlerhaften Implementierung zusammenhängen.

Neben Verbindungsproblemen und -abbrissen war besonders die Beeinflussung der RTK-Messung bei gleichzeitiger Rohdatenaufzeichnung auffällig. Wurde die Rohdatenaufzeichnung gestartet, bewirkte dies eine Verminderung der RTK-Höhenkoordinate in der Größenordnung von 6–8 cm. Dieses Problem wurde durch zusätzliche Aufnahmen mit ausschließlicher Rohdatenaufzeichnung und gleichartigen Geschwindigkeiten ( $v_1, v_2$ ) umgangen. Mittels dieser Daten könnte grundsätzlich eine Postprocessing-Auswertung erfolgen. Diese Auswertung steht jedoch nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit und wurde, mitunter aus Zeitgründen, nicht weiter verfolgt.

Schwerwiegender ist die nicht zu realisierende Aufzeichnungsrate von 1 Hz bei den RTK-Messungen. Diese Eingabe wurde von der Antenne nicht umgesetzt. Die Daten wurden lediglich mit 0.5 Hz gespeichert. Daraus folgt eine doppelt so lange Teilstrecke zwischen einer Aktualisierungsperiode von 22 cm bei  $v_1 = 400$  m/h bzw. 83 cm bei  $v_2 = 1500$  m/h. Dieser Effekt trat nicht bei der Rohdatenaufzeichnung auf.

### 5.2.5 Methodik der Auswertung

#### Statische Auswertung

Um die Genauigkeit der statischen Aufnahme zu beurteilen, wurden jeweils die Abweichungen der UTM-Koordinaten der aus GNSS bestimmten Position zur tachymetrischen UTM-Referenz-Koordinate ( $\Delta$ Rechtswert,  $\Delta$ Hochwert und  $\Delta$ Höhe), über die Zeit berechnet. Verwendet wurden nur fixed-Lösungen.

#### Kinematische Auswertung

*Prämisse:* Um eine totale Abweichung (zeitsynchroner Punktvergleich) während der Bewegung erfassen zu können, ist ein präziser Zeitbezug zwischen den einzelnen Messmethoden obligatorisch. Folglich müssen GNSS- und Referenz-Messungen zeitsynchron ausgeführt werden. Dies wird durch eine kontinuierliche tachymetrische Verfolgung der GNSS-Antenne mittels 360°-Prisma, welches ebenfalls an einem bekannten Punkt auf der Plattform befestigt wird, genähert realisiert. Prekär ist nun die korrekte Anbringung eines GPST-Zeitstempels an den Tachymetermessungen, insbesondere die präzise Berücksichtigung der unbekannt instrumentellen Latenz zwischen den Systemen, um eine Synchronität zu gewährleisten. Die Latenz entspricht der Differenz zwischen dem tatsächlichen Messzeitpunkt und dem Zeitpunkt des Messergebnisses. Sie entsteht durch eine Vielzahl von nicht gänzlich in Echtzeit stattfindenden methoden- und geräteabhängigen Einflüssen bzw. Prozessen (Datenübertragung, Zugriffszeiten, Berechnungszeiten, variable Satellitenverfügbarkeit, variable Messfrequenz, etc.). Die Erfassung der GPST wurde durch Kommunikation mit einem Raspberry Pi mit angeschlossener externer u-blox-Antenne durch die GeoCOM-Schnittstelle der TS16 erreicht. Aus mehreren Gründen (verminderte Anzielgenauigkeit des 360°-Prismas, mechanische Stabilität, Uhrendrift, variable Aufnahmefrequenz, Latenzuntersuchung) führte diese Variante jedoch zu keiner befriedigenden zeitnahen Lösung und wurde verworfen.

Somit erfolgt die kinematische Auswertung analog dem in Abbildung 5.12 gezeigten Prinzip mit leichten Adaptionen. Scheinbare Abweichungen sind aufgrund der niedrigen Geschwindigkeit sowie der Geradlinigkeit der Trajektorie nicht vorhanden bzw. nicht signifikant und müssen nicht berücksichtigt werden. Ähnlich wie in

Abschnitt 5.1.3 ist die berechnete Abweichung die kürzeste Verbindung im euklidischen Raum und somit eine idealisierte Abweichung. Für einen relativen Vergleich der Methoden ist dieser Faktor jedoch unwesentlich. Ferner ist die Differenz zwischen der berechneten und der totalen Abweichung, infolge der langsamen Bewegung, als gering einzuschätzen. Die Ergebnisse der Auswertung werden in Kapitel 5.3.3 und 5.3.4 dargestellt.

## 5.3 Ergebnisse

### 5.3.1 Ergebnisse EM100VT: GNSS-Genauigkeit

Wie in Kapitel 5.1.3 begründet, wurde eine Messfahrt als Referenz für weitere 5 Fahrten gewählt. Konkret handelt es sich bei den insgesamt 6 verwendeten Fahrten um folgende:

- Angern nach Dürnkrot

Fahrt 1: am 24. Juli von 14:30:16–14:37:38 UTC

Fahrt 2: am 25. Juli von 07:23:11–07:29:32 UTC = Referenz

Fahrt 3: am 25. Juli von 08:39:36–08:46:19 UTC

Fahrt 4: am 25. Juli von 09:51:26–09:58:00 UTC

- Dürnkrot nach Angern

Fahrt 5: am 25. Juli von 08:22:08–08:29:08 UTC

Fahrt 6: am 25. Juli von 09:08:12–09:14:45 UTC

### Lageabweichung

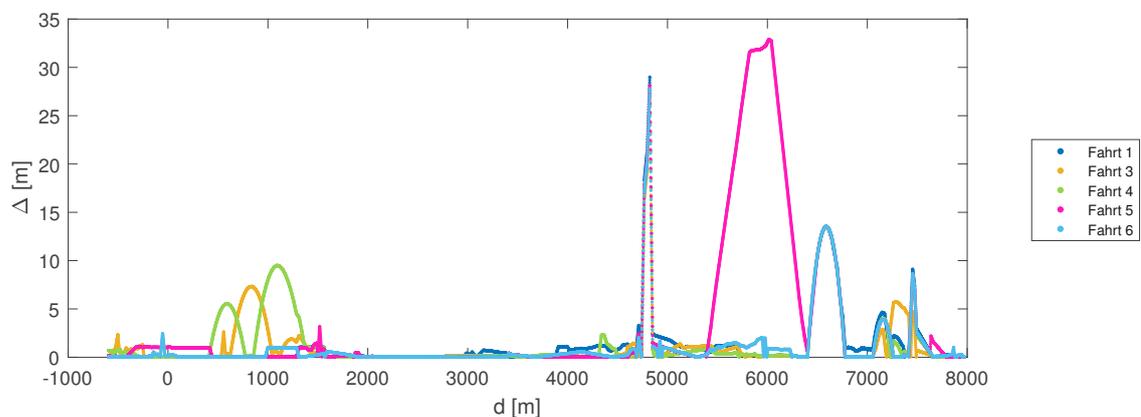


Abbildung 5.16: Lageabweichung Nordbahn; Daten ungefiltert

Abbildung 5.16 veranschaulicht das Ergebnis der berechneten Lageabweichung aller 5 Fahrten zur Referenz. Die Ordinate zeigt die Lageabweichung  $\Delta$  in Meter, die Abzisse die zurückgelegte Distanz  $d$  ebenfalls in Meter. Der Ursprung der Abszisse befindet sich zum Zeitpunkt der Fixpunktmessung  $t_0$  der Referenztrajektorie in Dürnkrot. Somit gilt:  $t_0 = d_0 = 0$ . Die Grafik beinhaltet sämtliche Daten, inklusive Ausreißer und scheinbaren Abweichungen. Der Interpolationsabstand beträgt 1 m.

Um eine korrekte Aussage der erreichbaren Genauigkeiten der Netz-RTK Lösung zu treffen, sind die Daten bezüglich Ausreißer und scheinbaren Abweichungen zu filtern. Die scheinbaren Abweichungen sind in Abbildung 5.16 gut erkennbar als hyperbel-affine Maxima, bei  $d \approx 1000$  m. Die scheinbaren Abweichungen bzw. ihre Entstehung sei verdeutlicht in Abbildung 5.17. Die weißen Marker (Abstand 1 Hz) sind die Positionen der Referenztrajektorie. Durch die nicht bestimmten Positionen in Fahrt 4 (grüne Marker) wird bis zur nächsten bekannten Position linear interpoliert. Die daraus resultierenden scheinbaren Abweichungen können, je nach Kurvigkeit und Interpolationsdauer, in den vorhandenen Datensätzen, auf  $> 10$  m anwachsen.



Abbildung 5.17: Scheinbare Abweichung zur Referenz  
(erstellt mit Google Earth Pro 7.3.2.5776)

Detektion der scheinbaren Abweichungen:

Zur Detektion der scheinbaren Abweichungen (siehe Kapitel 5.1.3) wird der zeitliche Abstand zwischen den Messungen pro Trajektorie betrachtet. Ist das Intervall der Messung  $> 1$  Sekunde (= Unterbrechung), wird der Streckenkilometer vor ( $d_{\delta,A}$ ) und nach ( $d_{\delta,B}$ ) der Unterbrechung lokalisiert. Die berechneten Abweichungen, welche sich nun innerhalb der Strecke  $d_{\delta} = [d_{\delta,A} d_{\delta,B}]$  befinden, werden entfernt. Abweichungen, welche sich innerhalb  $d_{\delta}$  befinden, jedoch  $\leq$  der  $2\sigma$ -EPOSA-Lageabweichung sind, werden beibehalten.

Mit der anschließenden Matlab-Funktion „isoutlier“ wird ein Ausreißer-Test bezüglich des Medians durchgeführt. Als Ausreißer gelten jene Werte, welche mehr als

3 skalierte absolute Medianabweichungen (sMAD) vom Median entfernt sind, siehe folgende Formel (5.2). Der Term  $\operatorname{erfc}^{-1}$  ist dabei die (Gaußsche) inverse komplementäre Fehlerfunktion.

$$\begin{aligned} MAD &= \operatorname{median}(|A_i - \operatorname{median}(A)|) \\ sMAD &= k \cdot MAD \\ k &= \frac{-1}{\sqrt{2} \cdot \operatorname{erfc}^{-1}\left(\frac{3}{2}\right)} \end{aligned} \quad (5.2)$$

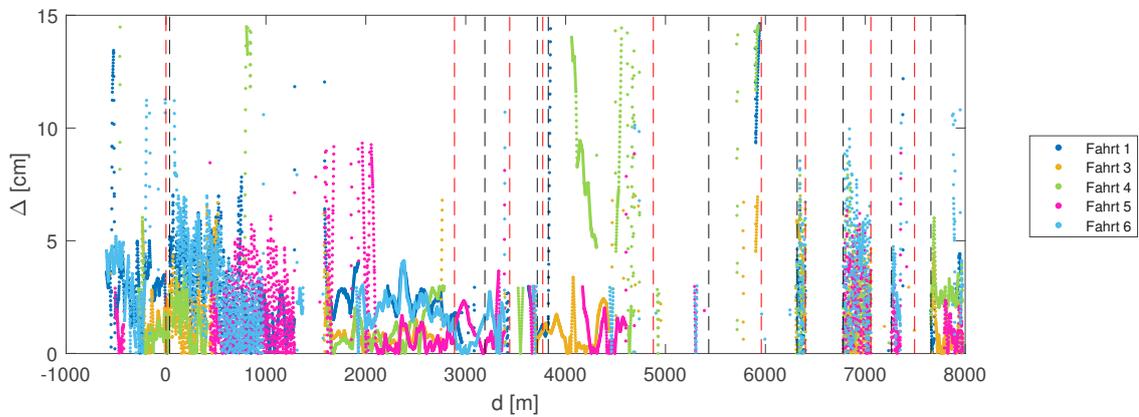


Abbildung 5.18: Lageabweichung Nordbahn; Daten gefiltert

Abbildung 5.18 zeigt die gefilterten Daten. Die vertikalen strichlierten Linien zeigen die gefundenen  $d_{\delta,A}$  (rot) bzw.  $d_{\delta,B}$  (schwarz). Somit liegt jeweils zwischen diesen Grenzen eine Unterbrechung vor, in Summe 9 Stück. Tabelle 5.7 konkretisiert diese Daten anhand statistischer Kennzahlen.

Lage-Genauigkeiten

Fahrt	$\bar{x}$ [cm]	Median [cm]	$\sigma$ [cm]	$Q_{0.68}$ [cm]	$Q_{0.95}$ [cm]
1	2.69	2.40	2.00	2.99	5.48
3	1.29	0.90	1.20	1.29	3.92
4	2.61	1.55	3.07	2.50	9.44
5	1.48	1.01	1.56	1.59	4.61
6	2.54	2.14	1.81	2.89	5.86
$\Sigma$	2.11	1.57	2.09	2.38	5.78

Tabelle 5.7: Mittelwert, Median, Standardabweichung und Wahrscheinlichkeitsverteilung

## Höhenabweichung

Abbildung 5.19 zeigt das Ergebnis der berechneten Höhenabweichung aller 5 Fahrten zur Referenz sämtlicher Daten. Der Interpolationsabstand beträgt 1 m. Die Achsenbezeichnung ist entsprechend der aus Abbildung 5.16 bzw. 5.18.

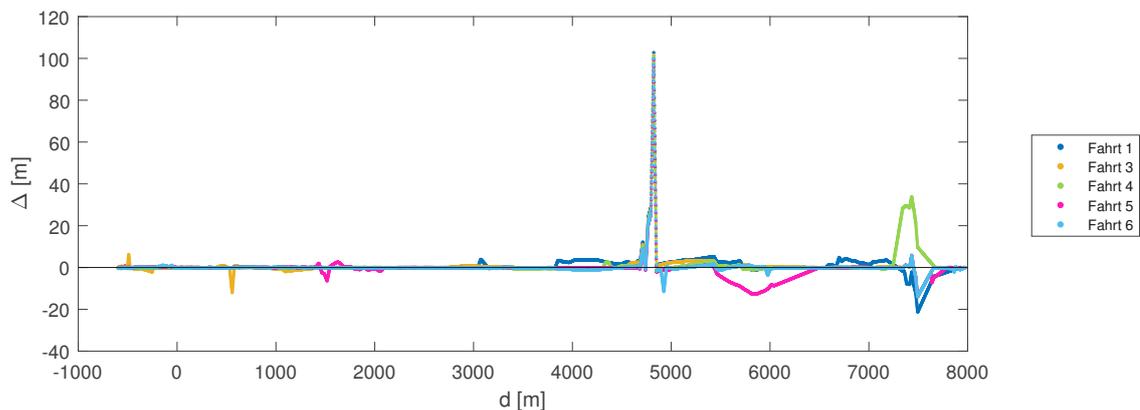


Abbildung 5.19: Höhenabweichung Nordbahn; Daten ungefiltert

Analog zur Lageauswertung müssen die Daten zur Auswertung einer erwartbaren Genauigkeit gefiltert werden. Die Unterbrechungen  $d_\delta$  sind dabei ident zu jenen in Abbildung 5.18. Unterschiedlich sind jedoch die Abweichungen, welche innerhalb den Unterbrechungen beibehalten werden. Diese werden anhand der Größe der Abweichungen detektiert, welche sich bezüglich der Distanz nicht konform zu den der Lageabweichungen verhalten. Demnach werden durch die Ausreißerdetektion auch nicht exakt die selben Punkte gefiltert. Wird die Datenfilterung (Entfernung der scheinbaren Abweichungen und Ausreißer) an den Höhenabweichungen angewandt, ergibt sich folgende Abbildung 5.20.

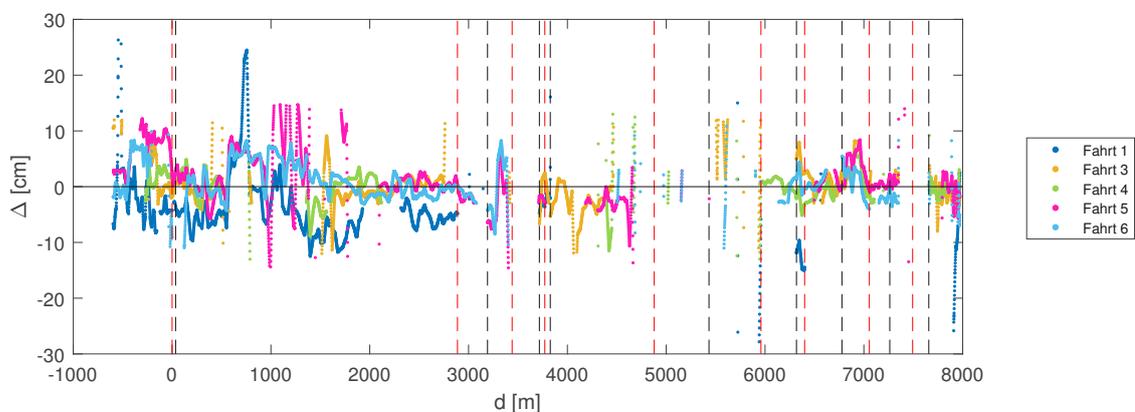


Abbildung 5.20: Höhenabweichung Nordbahn; Daten gefiltert

In Tabelle 5.8 werden statistische Kennzahlen zur gefilterten Höhenabweichung angegeben. Die Werte verstehen sich als Längenmaß (vorzeichenunabhängig).

Höhen-Genauigkeiten					
Fahrt	$\bar{x}$ [cm]	Median [cm]	$\sigma$ [cm]	$Q_{0.68}$ [cm]	$Q_{0.95}$ [cm]
1	5.82	5.16	3.93	6.59	11.84
3	2.30	1.55	2.31	2.31	7.90
4	1.99	1.52	1.86	2.28	5.45
5	3.30	2.11	3.19	4.06	9.88
6	2.59	1.88	2.17	2.86	7.04
$\Sigma$	3.16	2.11	3.07	3.74	8.96

Tabelle 5.8: Mittelwert, Median, Standardabweichung und Wahrscheinlichkeitsverteilung

### 5.3.2 Ergebnisse EM100VT: Transformation

Bevor die eigentlichen Ergebnisse der Transformation gezeigt werden, wird ein Effekt demonstriert, welcher nicht fundiert erklärt, sondern nur festgestellt werden konnte. Die folgende Auswertung beruht auf der relativen Antennengeometrie anhand der Streckendifferenzen [AB], [BD], [CD] und [AC] während der Fahrt. Diese Geometrie hat unmittelbaren Bezug zu den Transformationsparametern und folglich direkte Auswirkung auf die Genauigkeit der Passpunkttransformation bzw. auf die resultierende Positionsgenauigkeit der damit bestimmten Koordinaten. Die folgende Abbildung 5.21 zeigt nun die Abweichung dieser Streckendifferenzen  $\Delta$  zu den Solldifferenzen im Objektsystem.

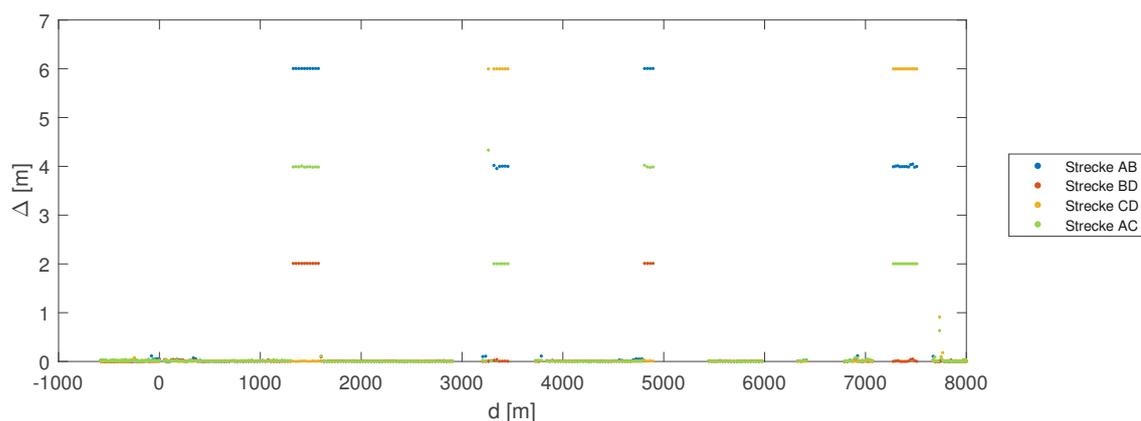


Abbildung 5.21: Abweichung der Antennen-Streckendifferenzen

Auffallend sind die Sprünge der Streckendifferenzen im Abstand von rund 2 m. Es sei erwähnt, dass die Soll-Streckendifferenzen im Objektsystem rund 6 m in Fahrtrichtung bzw. rund 2 m normal dazu betragen. Zur Erklärung wird ein Matlab-Lageplot der Referenztrajektorie in Google Earth importiert (siehe Abbildung 5.22). Die linke

Abbildung zeigt eine Übersicht der aufgenommenen Positionen. Die rechte Abbildung stellt eine vergrößerte Darstellung eines Problemereichs (Abschattung durch eine Brücke) dar.

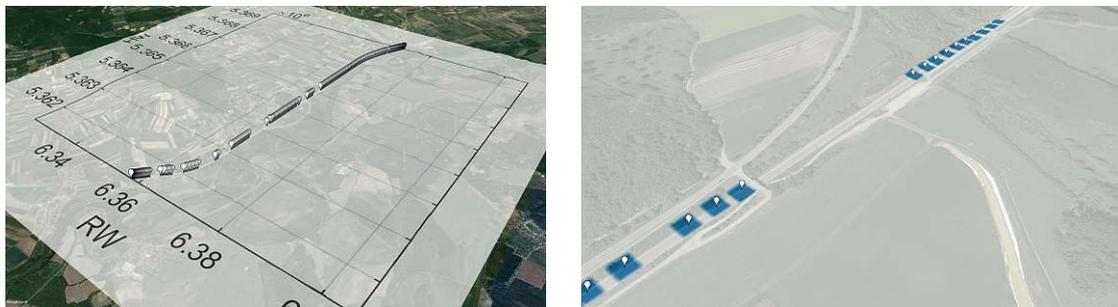


Abbildung 5.22: Probleme der Antennengeometrie bei Abschattung  
(erstellt mit Google Earth Pro 7.3.2.5776)

Diese rechte Grafik in Abbildung 5.22 wird nun anhand eines Lageplots der vier Antennen betrachtet (siehe Abbildung 5.23). In dieser Abbildung zeigt die linke Grafik die drei zuletzt bestimmten Positionen (Rechtswert, Hochwert) der 4 Antennen vor der Brückendurchfahrt, die rechte Grafik zeigt die ersten drei Positionen danach. In der rechten Grafik ist die veränderte gegenseitige Geometrie ersichtlich. Die Positionen der hinteren Antennen A und C nehmen fälschlicherweise die Position der vorderen Antenne D ein bzw. bekommen Antenne A und C die selben Koordinaten wie Antenne D zugewiesen, wodurch die Abweichungen in 5.21 begründet werden. Die Herkunft dieser „Positionssprünge“ scheint in Zusammenhang mit den Abschattungen zu stehen und kann nicht weiter erörtert werden. Die Sprünge werden als Ausreißer wahrgenommen und demzufolge entfernt.

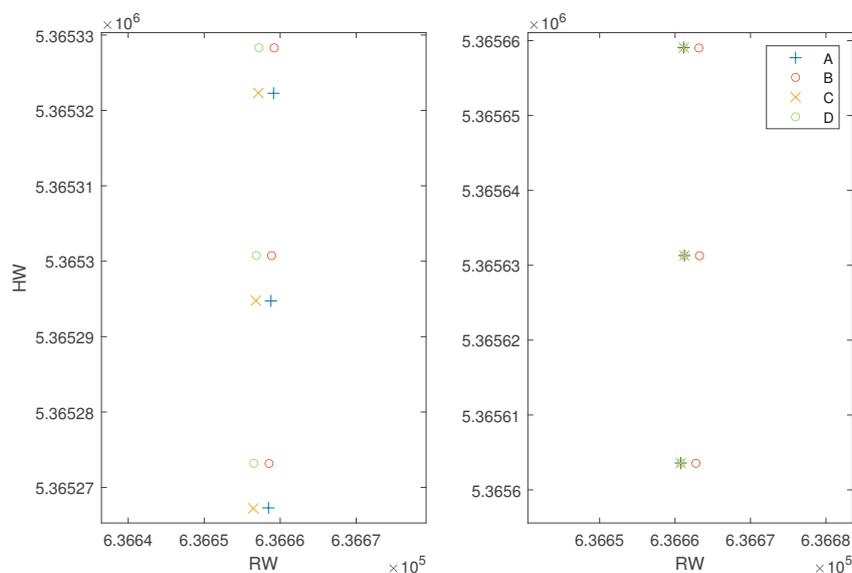


Abbildung 5.23: Positionssprünge der Antenne anhand von Abschattungen

Anhand dieser signifikanten Abweichungen werden die Positionssprünge detektiert und entfernt. Ebenso wird mit Ausreißern verfahren. Als Ausreißer werden an dieser Stelle Abweichungen verstanden, welche  $> 6$  cm betragen. Dieser Grenzwert ergibt sich aus der EPOSA  $2\sigma$ -Genauigkeit von 3 cm. Das Ergebnis der Datenreduktion zeigt Abbildung 5.24. Dabei sind 95% der Abweichungen ( $Q_{0.95}$ )  $\leq 2.64$  cm.

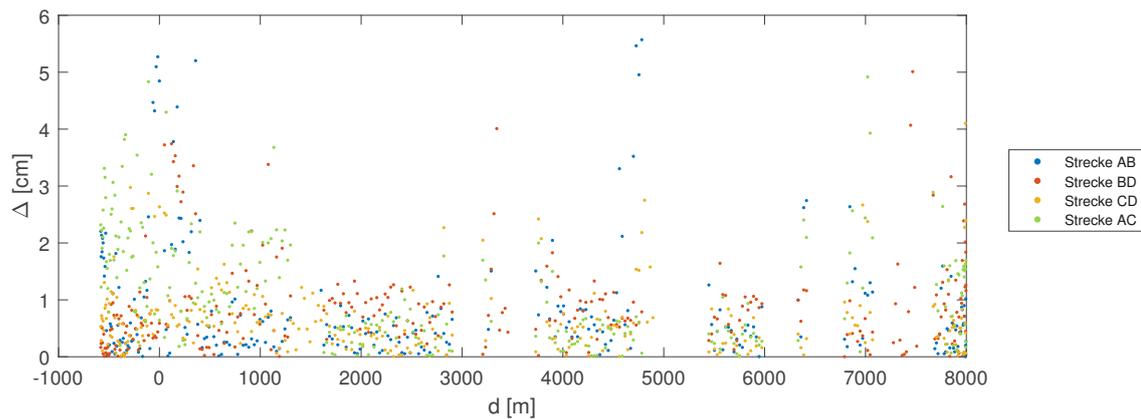


Abbildung 5.24: Abweichung der Antennen-Streckendifferenzen ohne Sprünge/Ausreißer

### Genauigkeiten der Transformationsparameter

Im Folgenden werden nun die Genauigkeiten der ermittelten Transformationsparameter analysiert. Die beiden Abbildungen 5.25 (Genauigkeit der Translation) und 5.26 (Genauigkeit der Rotation) zeigen die Genauigkeiten, welche der Transformation zwischen Antennen-Koordinaten im Objektsystem und Antennen-Koordinaten im GNSS-System (ohne Positionssprünge und Ausreißer) entstammen. Eine starke Korrelation zu den in Abbildung 5.24 gezeigten Abweichungen der Antennenstreckendifferenzen ist erwartungsgemäß gegeben.

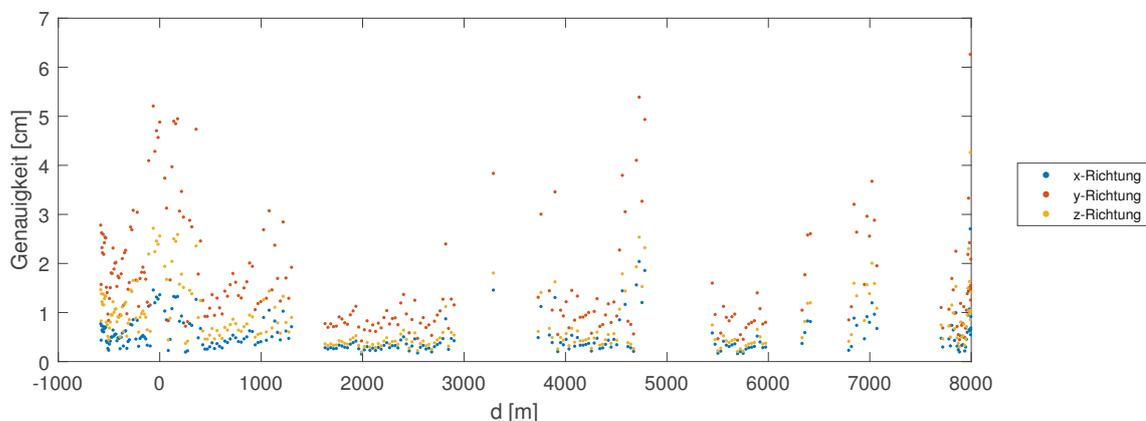


Abbildung 5.25: Genauigkeit der Translationsparameter

Allerdings bieten die Genauigkeiten der Transformationsparameter eine stärkere Aussage über die zu erwartende Positionsgenauigkeit als noch die Antennenstreckendifferenzen, da rein über Streckendifferenzen keine Aussage über das Kongruenzverhalten der Geometrie getroffen werden kann. In Tabelle 5.9 wird die Wahrscheinlichkeitsverteilung dieser Genauigkeiten anhand des 68 %-Quartils und des 95 %-Quartils angegeben. Um die Auswirkung der Antennengeometrie zu verdeutlichen, wird in Tabelle 5.9 die Wahrscheinlichkeitsverteilung einer weiteren Variante (maximale Antennen-Streckendifferenz  $\leq 3$  cm entsprechend der EPSOA  $1\sigma$ -Genauigkeit) hinzugefügt.

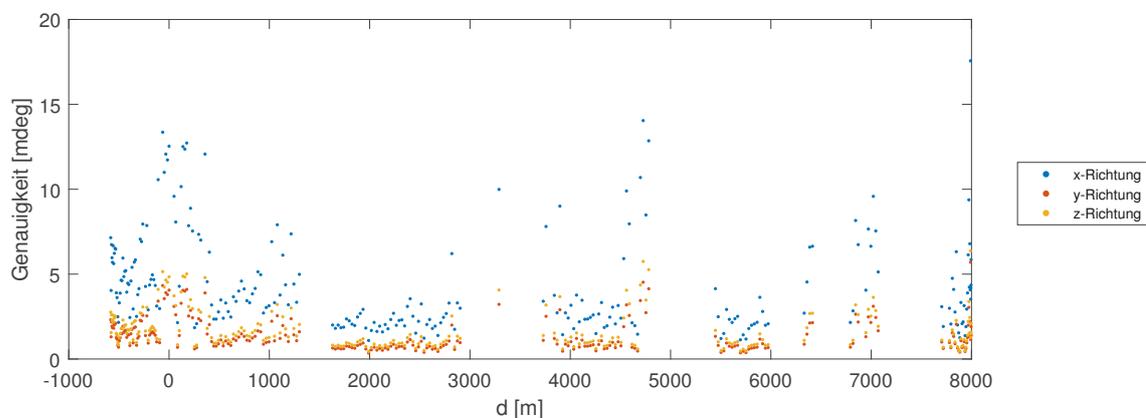


Abbildung 5.26: Genauigkeit der Rotationsparameter

Genauigkeiten: Transformationsparameter

		$\Delta$ Strecke [cm]	Translation [cm]	Rotation [mdeg]
max $\Delta$ : 6 cm	Q <sub>0.95</sub>	2.635	2.766	7.033
	Q <sub>0.68</sub>	0.930	1.077	2.532
max $\Delta$ : 3 cm	Q <sub>0.95</sub>	2.215	2.121	5.350
	Q <sub>0.68</sub>	0.874	0.914	2.182

Tabelle 5.9: Wahrscheinlichkeitsverteilung

### Genauigkeiten der transformierten Koordinaten

Es folgen mit den zwei Abbildungen 5.27 und 5.28 die Ergebnisse der Differenzbildung  $dM$  zwischen dem berechneten Streckenmittelpunkt  $M$  der Referenztrajektorie und dem entsprechenden Streckenmittelpunkt  $M'$ , berechnet aus den transformierten GNSS-Koordinaten  $B'$  und  $D'$ . In Abbildung 5.27 ist die Differenz in ITRF-Koordinaten dargestellt, in Abbildung 5.28 die Differenz bezüglich UTM-Koordinaten. Zusätzlich zu den Koordinatendifferenzen wird in letzterer Abbildung die Lageabweichung (Helmert'scher Punktlagefehler) eingeführt.

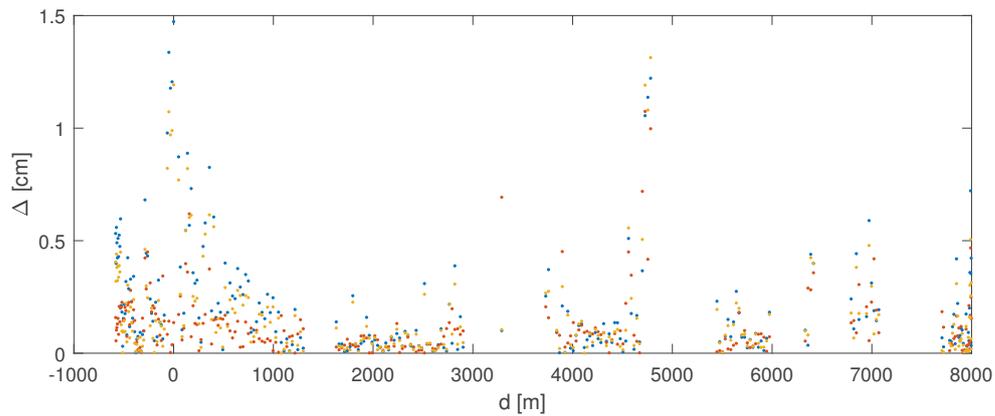


Abbildung 5.27: Abweichung der transformierten Koordinaten (ITRF)

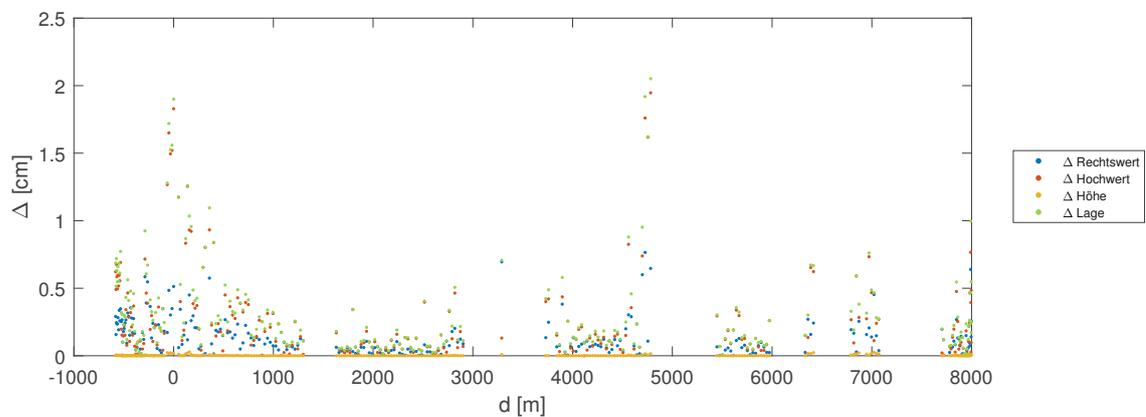


Abbildung 5.28: Abweichung der transformierten Koordinaten (UTM)

Abschließend werden mit Tabelle 5.10 die Genauigkeiten der Abweichungen der transformierten Koordinaten in Form einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, sinngemäß mit Tabelle 5.9, zusammengefasst.

Koordinatendifferenzen durch die Transformation [mm]

		Rechtswert	Hochwert	Höhe	Lage
max $\Delta$ : 6 cm	$Q_{0.95}$	3.90	9.09	0.16	9.91
	$Q_{0.68}$	1.66	2.61	0.02	3.21
max $\Delta$ : 3 cm	$Q_{0.95}$	2.85	5.93	0.07	6.64
	$Q_{0.68}$	1.34	2.13	0.01	2.61

Tabelle 5.10: Wahrscheinlichkeitsverteilung

### 5.3.3 Ergebnisse ZusiVT: Statisch

#### Koordinatendifferenzen Netz-RTK

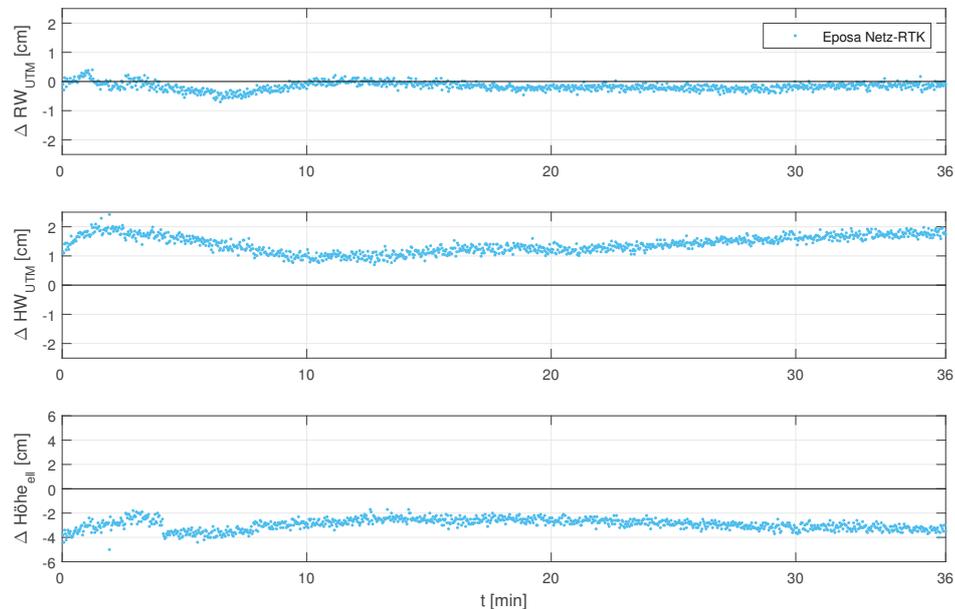


Abbildung 5.29: Koordinatendifferenzen: statische Netz-RTK Messung zur Referenz

Abbildung 5.29 zeigt die Koordinatenabweichungen der statischen Netz-RTK Messung vor der ersten Fahrt. Die Abweichungen variieren bei sämtlichen Koordinaten erwartungsgemäß zu Beginn stärker. Der Rechtswert konvergiert nach ca. 8 Minuten, Hochwert und Höhe zeigen keine klare Konvergenz während des Beobachtungszeitraums.

Genauigkeiten: Netz-RTK, statisch

	$\bar{x}$ [cm]	$\sigma$ [cm]	$Q_{0.68}$ [cm]	$Q_{0.95}$ [cm]
$\Delta$ Rechtswert	0.19	0.12	0.24	0.40
$\Delta$ Hochwert	1.40	0.30	1.58	1.87
$\Delta$ Höhe	2.83	0.45	3.00	3.60
$\Delta$ Lage	1.42	0.29	1.60	1.88

Tabelle 5.11: Mittelwert, Standardabweichung & Wahrscheinlichkeitsverteilung

Die Basislinienlänge ist, bedingt durch das VRS-Konzept, sehr kurz. Demnach ist der limitierende Genauigkeitsfaktor durch den lokalen Fehler des Interpolationsmodells charakterisiert.

## Koordinatendifferenzen Basis/Rover-RTK

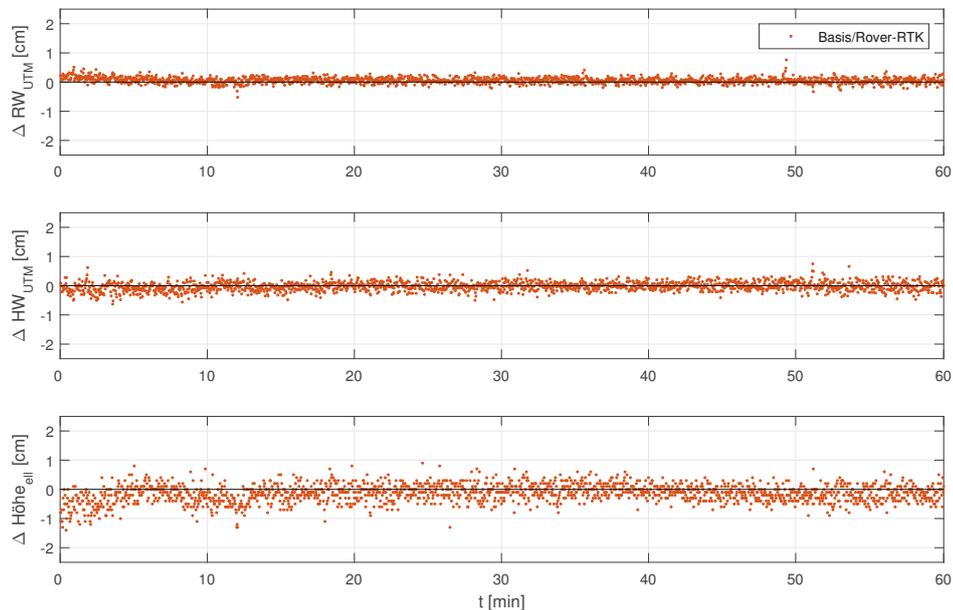


Abbildung 5.30: Koordinatendifferenzen: statische Basis/Rover-RTK Messung zur Referenz

Die Abbildung 5.30 zeigt die statische Basis/Rover-RTK Messung vor der ersten Fahrt. Bereits nach 3–4 Minuten ist bei sämtlichen Koordinaten ein Konvergenzverhalten feststellbar.

Genauigkeiten: Basis/Rover-RTK, statisch

	$\bar{x}$ [cm]	$\sigma$ [cm]	$Q_{0.68}$ [cm]	$Q_{0.95}$ [cm]
$\Delta$ Rechtswert	0.09	0.07	0.11	0.23
$\Delta$ Hochwert	0.12	0.10	0.15	0.32
$\Delta$ Höhe	0.24	0.20	0.30	0.60
$\Delta$ Lage	0.17	0.10	0.20	0.37

Tabelle 5.12: Mittelwert, Standardabweichung und Wahrscheinlichkeitsverteilung

Ein Vergleich der beiden Tabellen 5.11 und 5.12 zeigt eine signifikant höhere Genauigkeit der Basis/Rover-RTK Lösungen. Der eigentliche Interessenbereich ist nach Eintritt der Konvergenz. Diesen Vergleich zeigt die nachstehende Tabelle 5.13. Um gleiche Randbedingungen zu schaffen, wurden den statischen Datensätzen die ersten 8 Minuten ( $\approx$  Konvergenzeintritt Netz-RTK) extrahiert. Zusätzlich wurde der Beobachtungszeitraum auf eine Zeit von 28 Minuten (maximale Beobachtungsdauer der Netz-RTK Variante) begrenzt. Die Tabelle 5.13 zeigt die signifikant höhere

Genauigkeit der Basis/Rover-Lösung (Faktor 9–10 bezüglich 68 %-Quantil; Faktor 5 bezüglich 95 %-Quantil).

Genauigkeiten: Netz-RTK vs. Basis/Rover-RTK, statisch

	Netz-RTK		Basis/Rover-RTK	
	Q <sub>0.68</sub> [cm]	Q <sub>0.95</sub> [cm]	Q <sub>0.68</sub> [cm]	Q <sub>0.95</sub> [cm]
$\Delta$ Höhe	3.00	3.50	0.30	0.70
$\Delta$ Lage	1.52	1.82	0.18	0.35

Tabelle 5.13: Wahrscheinlichkeitsverteilung; exklusive Konvergenzzeit

### 5.3.4 Ergebnisse ZusiVT: Kinematisch

#### Lageabweichung

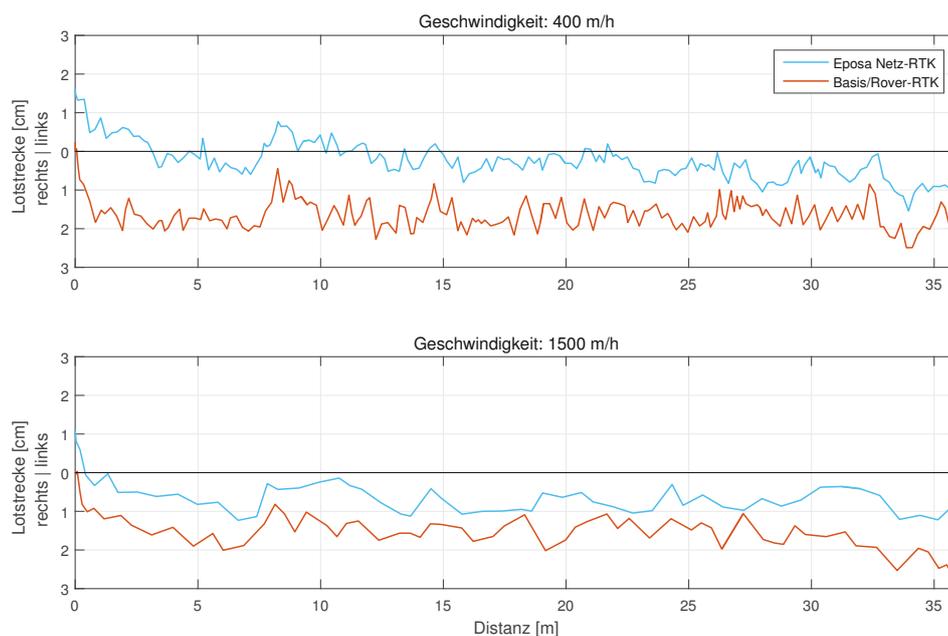


Abbildung 5.31: Kinematische Lageabweichung zur Referenz

Lage-Genauigkeiten: Netz-RTK, kinematisch

Geschwindigkeit	$\bar{x}$ [cm]	$\sigma$ [cm]	Q <sub>0.68</sub> [cm]	Q <sub>0.95</sub> [cm]
400 m/h	0.46	0.35	0.52	1.14
1500 m/h	0.73	0.36	0.93	1.22

Tabelle 5.14: Mittelwert, Standardabweichung und Wahrscheinlichkeitsverteilung

Lage-Genauigkeiten: Basis/Rover-RTK, kinematisch				
Geschwindigkeit	$\bar{x}$ [cm]	$\sigma$ [cm]	$Q_{0.68}$ [cm]	$Q_{0.95}$ [cm]
400 m/h	1.63	0.39	1.83	2.15
1500 m/h	1.48	0.53	1.68	2.43

Tabelle 5.15: Mittelwert, Standardabweichung und Wahrscheinlichkeitsverteilung

In Abbildung 5.31 ist die Ordinaten-Bezeichnung „links | rechts“ als Abweichung links bzw. rechts von der Referenz in Fahrtrichtung zu verstehen. Während beim statischen Messvorgang die Basis/Rover-Lösung die genaueren Ergebnisse liefert, ist dies bei der kinematischen Lösung in der Ebene nicht der Fall. Ausgehend vom Startpunkt entsteht während der Beschleunigungsphase ein Offset von rund 1.5 cm, welcher beibehalten wird. Ein geschwindigkeitsabhängiger signifikanter Unterschied in der Basis/Rover-Lösung ist nicht feststellbar.

Die Netz-RTK-Lösung liefert im kinematischen Modus geringere Abweichungen mit ebenfalls geringerer Standardabweichung und ist somit die genauere Lösung. Ein geschwindigkeitsabhängiger signifikanter Unterschied ist, wie in der Basis/Rover-Lösung, nicht feststellbar.

## Höhenabweichung

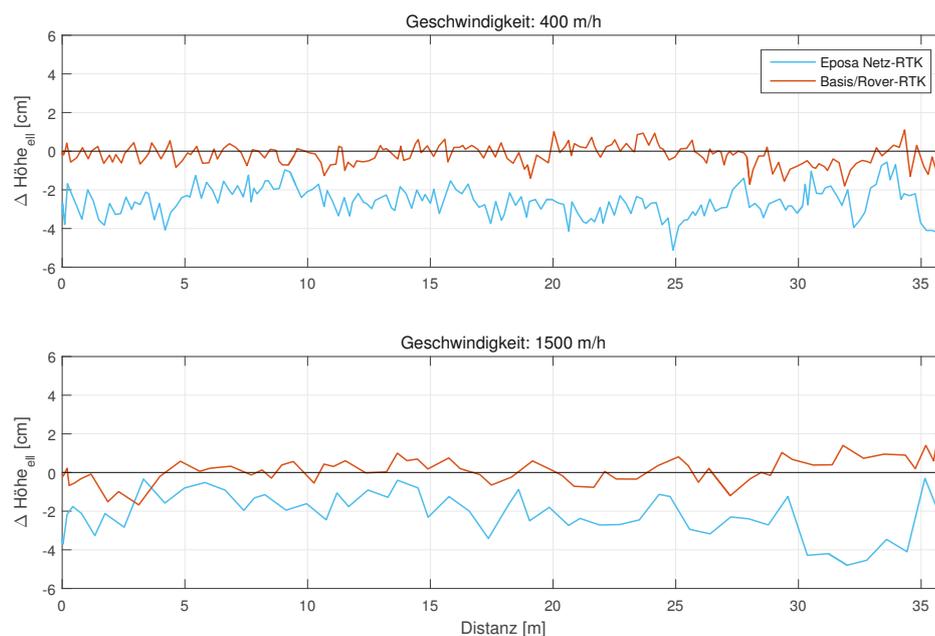


Abbildung 5.32: Kinematische Höhenabweichung

Im Gegensatz zur Lageabweichung könnte die Abweichung der Höhe, angesichts der geringen Variation während der kinematischen Messung, auch mit Absoluthöhen anschaulich dargestellt werden. Aus Konformitätsgründen wird die Höhenabweichung (siehe Abbildung 5.32) jedoch konsistent zur Lageabweichung dargestellt.

Höhen-Genauigkeiten: Netz-RTK, kinematisch

Geschwindigkeit	$\bar{x}$ [cm]	$\sigma$ [cm]	$Q_{0.68}$ [cm]	$Q_{0.95}$ [cm]
400 m/h	2.61	0.75	2.92	3.85
1500 m/h	2.20	1.13	2.71	4.28

Tabelle 5.16: Mittelwert, Standardabweichung und Wahrscheinlichkeitsverteilung

Höhen-Genauigkeiten: Basis/Rover-RTK, kinematisch

Geschwindigkeit	$\bar{x}$ [cm]	$\sigma$ [cm]	$Q_{0.68}$ [cm]	$Q_{0.95}$ [cm]
400 m/h	0.43	0.35	0.55	1.18
1500 m/h	0.53	0.53	0.61	1.46

Tabelle 5.17: Mittelwert, Standardabweichung und Wahrscheinlichkeitsverteilung

Entgegengesetzt der kinematischen Lage-Abweichung verhält sich die kinematische Höhenabweichung entsprechend der statischen Messung. Dementsprechend sind die Basis/Rover-RTK-Abweichungen deutlich geringer als die der Netz-RTK Lösung.

## 6 Zusammenfassung

Für die Reinigung des Oberbau-Schotterbetts einer Gleisanlage kommen moderne Reinigungsmaschinen zum Einsatz. Für eine hohe Qualität der Reinigung ist ein zentimetergenauer, ebener sowie gleichförmiger Längsschnitt notwendig. In dieser Arbeit wird evaluiert, welchen Beitrag GNSS-basierte Positionierungsmethoden leisten können und welche Voraussetzungen dafür erfüllt sein müssen. Aus dieser Grundüberlegung resultiert primär die in der Einleitung zuerst gestellte Frage: „*Mit welchen GNSS-basierten Echtzeit-Methoden sind prinzipiell hohe Genauigkeiten (Zentimetergenauigkeit) erzielbar?*“

In Kapitel 3 wurden diese verschiedenen präzisen Echtzeit-Methoden gegenübergestellt. Das wichtigste Kriterium ist die Genauigkeit. Gemessen an diesem sind die beiden RTK-Methoden (lokales RTK und Netz-RTK) am geeignetsten (siehe auch Tabelle 3.4).

Werden die beiden RTK-Methoden gegenübergestellt, bietet die lokale RTK Methode mehrere Vorteile gegenüber Netz-RTK, allen voran die Unabhängigkeit von Mobilfunk- und Referenzstationsnetz, wodurch sich ein globaler homogener Einsatzbereich ergibt. Wird mit lokalem RTK ohne Mobilfunk gearbeitet, ist speziell in urbanen Gebieten die Funk-Reichweite (Distanz zwischen Rover und Basis) mit  $< 2\text{--}3\text{ km}^1$  sehr limitiert. Im ländlichen Bereichen mit geringer Abschattung sind Reichweiten von rund  $10\text{ km}^1$  erzielbar. Wird stattdessen der Mobilfunk verwendet, ist diese Methode ebenfalls mit rund  $10\text{ km}$  beschränkt. Diese Limitation rührt aus der RTK-charakteristischen starken Basislinienabhängigkeit her. Aufgrunddessen ist lokales RTK für Anwendungen mit Geschwindigkeiten deutlich oberhalb von typischen Arbeitsgeschwindigkeiten einer Schotterbetteinreinigungsmaschine ( $> 1500\text{ km/h}$ ) nicht wirtschaftlich anwendbar. Für kleinräumige Streckenabschnitte mit Geschwindigkeiten entsprechend der Arbeitsgeschwindigkeit von Schotterbetteinreinigungsmaschinen, speziell in Gebieten ohne oder nur sehr inhomogener Netz-RTK Abdeckung, kann die lokale RTK-Methode eine Alternative zur Netz-RTK Lösung sein. Ein weiterer Vorteil ist die höhere Messfrequenz. Durch die ausschließliche Anwendbarkeit der lokalen Methode bei niedrigen Geschwindigkeiten verliert

---

<sup>1</sup>mit 1 Watt Sendeleistung angesichts Javad SIGMA

dieser Faktor jedoch an Relevanz. Reguläre Korrekturdaten-Update-Raten von Referenznetzbetreibern liegen bei 1 Hz, wodurch selbst bei einer Maximalgeschwindigkeit von 1500 m/h noch alle rund 42 cm eine Position bestimmt werden kann. Weiters bildet die Notwendigkeit einer präzisen Positionierung der lokalen Basisstation einen erheblichen Nachteil. Diese muss für die Echtzeitanwendung im Vorfeld erfolgen und kann sich je nach Umfeld (Topographie, Referenznetzbetreiber, Land) als schwierig bzw. aufwändig herausstellen.

Ist ein homogenes Referenznetz verfügbar, wird wegen genannter Nachteile (Positionierung der Basis und Reichweite) den Netz-RTK Methoden der Vorzug gegeben. Mit EPOSA Netz-RTK sind bei langsamer Bewegung ( $\leq 1500$  m/h; System: ZusiVT) und unter Voraussetzung idealer Bedingungen sehr hohe Lage-Genauigkeiten von  $< 1$  cm ( $Q_{0.68}$ ; siehe Tabelle 5.14) sowie Höhen-Genauigkeiten von  $< 3$  cm ( $Q_{0.68}$ ; siehe Tabelle 5.16) erreichbar. Signifikante Genauigkeitsunterschiede hinsichtlich der Geschwindigkeitsvergleiche (400 m/h vs. 1500 m/h) sind sowohl bei der lokalen, als auch bei der Netz-RTK Methode nicht feststellbar.

An der Nordbahn durchgeführte EPOSA Netz-RTK Tests, anhand mehrerer Messfahrten mit deutlich höheren Geschwindigkeiten ( $\leq 100$  km/h; System: EM100VT) sowie mäßigen Bedingungen bezüglich Sichtbarkeit und Abschattung, ergeben Lage-Genauigkeiten von  $< 2.4$  cm ( $Q_{0.68}$ ; siehe Tabelle 5.7) bzw. Höhen-Genauigkeiten von  $< 3.8$  cm ( $Q_{0.68}$ ; siehe Tabelle 5.8). Es sei darauf hingewiesen, dass die Lage- bzw. Höhen-Abweichungen der Messfahrten nicht gegen eine absolute Referenz, sondern zu einer ausgewählten Messfahrt durchgeführt wurden. Genauigkeitsangaben bezüglich etwaiger Absolutkoordinaten können dadurch gering (im positiven als auch negativen Sinne) differieren. Ferner wurden fehlerhafte GNSS-Messungen und Ausreißer entfernt, um adäquate Aussagen bezüglich einer in der Praxis erreichbaren Genauigkeit treffen zu können. Dabei handelt es sich um eine beträchtliche Reduzierung der vorhandenen GNSS-Daten von teilweise (trajektorienabhängig)  $> 50\%$ . Dieser Umstand soll Bewusstsein schaffen, dass (zumindest für die erwähnte Teststrecke) keine mit 1 Hz-kontinuierliche Datenaufnahme erfolgen kann. Mehrmals entstehen Datenlücken von teils  $> 10$  s ( $\cong$  rund 280 m bei 100 km/h).

Die erwähnten Lage- und Höhengenaugigkeiten der EM100VT-Messfahrten resultieren aus einem Positionsvergleich der GNSS-Antennen zu einer Referenz. Um die jeweilige GNSS-Position der Spurkranzpunkte bzw. der Gleisachse zu bestimmen, wird systembedingt eine überbestimmte 7-Parameter-Transformation angewandt. Werden präzise Positionierungen der dafür benötigten Passpunkte (Antennen am EM100VT) vorausgesetzt (siehe Abschnitt 5.3.2), sind zusätzliche Positionierungsunsicherheiten im Millimeterbereich zu erwarten (siehe Tabelle 5.10).

Die zweite eingangs gestellte Frage „*Unter welchen Bedingungen lässt sich die gewünschte Genauigkeit erreichen?*“ wurde mittelbar bereits mit der vorangegangenen Fragestellung beantwortet. Neben den Bedingungen der hinreichenden Satellitensignalverfügbarkeit (Anzahl und Abschattung) ist Netz-RTK-bedingt die Mobilfunkanbindung für den Korrekturdatenempfang wesentlich. Damit wird direkt die 4. Fragestellung bezüglich des *allerorts möglichen Korrekturdatenempfanges* mit aufgegriffen. Die autarke Funkübertragung wurde bereits mit der lokalen RTK-Methode abgehandelt. Wird Mobilfunk verwendet, ist die Datenübertragungsrate der GPRS-Technik für derzeit verfügbare GNSS ausreichend. Global betrachtet sind rund 87 % der Weltbevölkerung mit mindestens Mobilfunk der 2. Generation erschlossen. Eine allgemeine fundierte Aussage einer flächenbezogenen Mobilfunk-Abdeckung kann nicht getroffen werden und ist gebietsspezifisch zu ergründen. In Entwicklungsländern und exponierten Gebieten ist in jedem Fall mit Signalverlust zu rechnen.

Eine Frage der Mobilfunkabdeckung ist auch bereits eine partielle Antwort der 3. Frage: „*Sind unterschiedliche Genauigkeiten hinsichtlich globaler Einsätze zu erwarten?*“ Allerdings ergeben sich auch unabhängig der unvollkommenen Mobilfunkabdeckung globale Genauigkeitsunterschiede. Wesentlich für die Genauigkeit der Netz-RTK Methoden ist eine hinreichend dichte sowie homogene Verteilung von Referenzstationen. Referenznetze in Österreich bzw. ganz allgemein in Europa können diese Forderung erfüllen. Weltweit ist diese Netz-Struktur, äquivalent zum Mobilfunk, an exponierten Orten und in Entwicklungsländern, nicht vorhanden. Weiters sind Referenznetze vielerorts inhomogen, wodurch die Positionierungsgenauigkeit in den Dezimeterbereich sinkt (siehe z. B. Abschnitt 3.2.3). An dieser Stelle kann alternativ auf kommerzielle PPP-Dienste wie z. B. Centerpoint RTX verwiesen werden. Diese können i. A. zwar nicht die hohen Genauigkeiten optimal konzipierter RTK-Netze erreichen, jedoch (wenn die längere Konvergenzzeit in Kauf genommen werden kann) soll eine Positionierungsgenauigkeit im Zentimeterbereich möglich sein. Praktische Tests konnten diesbezüglich nicht durchgeführt werden und beruhen ausschließlich auf Rechercharbeit.

Abschließend lautet die Frage Nr. 5: „*Wie viele Strecken der ÖBB erfüllen diese Anforderungen?*“ Bezüglich der Methodik ist keine Einschränkung gegeben. Mit APOS und EPOSA stehen zwei österreichweite homogene Referenznetze zu Verfügung, ebenso sind PPP-Dienste wie Centerpoint RTX und Starfix G2+ verfügbar. Die Mobilfunkversorgung ist nicht im ganzen Bundesgebiet gegeben, jedoch sind sämtliche Gleisanlagen der ÖBB abgedeckt<sup>2</sup>. Limitation ist einzig durch die lokale Abschattung gegeben, diese ist jedoch substanziell (siehe z. B. Abbildung 5.9)

<sup>2</sup>durch Kombination von GSM-R und Datenübertragung der Telekommunikationsunternehmen

und führt von groben Fehlpositionierungen bis hin zum gänzlichen Versagen einer Positionierung. Durch kurze Unterbrechungen (z. B. Brückendurchfahrten) können Signalverluste  $> 10$  s entstehen, womit über eine Strecke weniger Meter (in Anbetracht der Arbeitsgeschwindigkeit einer RM) keine Aktualisierung der Position erfolgen kann. Kritischer sind Abschattungen entlang des Gleiskörpers, welche somit nur begrenzt geschwindigkeitsabhängig sind. Dazu zählen Bebauung, Bewuchs sowie ungünstige Landformen wie Rinnen, Längstäler oder Ähnliches. Hier ist der Signalverlust streckenabhängig und kann auf mehrere 100 m anwachsen. Eine Prognose kann durch Sichtbarkeitsanalysen mithilfe kostenpflichtiger DOMs gegeben werden. Diese DOMs sind jedoch aus vielfältigen Gründen (siehe Sichtbarkeitsanalyse in Abschnitt 4.4) kritisch zu interpretieren. Insofern stellt die lokale Abschattung den limitierenden Faktor bezüglich der präzisen GNSS-Positionierung auf den Strecken der ÖBB dar. Inwieweit die dadurch entstehenden Positionierungsunterbrechungen Einfluss auf die Durchführbarkeit der Schotterbettreinigung haben, steht nicht im Ermessen des Autors der vorliegenden Arbeit.

# Abkürzungsverzeichnis

ÖBB	Österreichische Bundesbahnen
BEV	Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen
C/A	Coarse/Acquisition
DGNSS	Differential GNSS
DHM	Digitales Höhenmodell
DOD	Department of Defense
DOM	Digitales Oberflächenmodell
DOP	Dilution of Precision
ECEF	Earth Centered Earth Fixed
ECI	Earth Centered Inertial
EGNOS	European Geostationary Navigation Overlay Service
EM	Elektronischer Messtriebwagen
EPOSA	Echtzeit Positionierung Austria
ETRF	European Terrestrial Reference Frame
ETRS89	European Terrestrial Reference System 1989
GAGAN	GPS Aided Geo Augmented Navigation
GDOP	Geometric Dilution of Precision
GLONASS	Globalnaja Nawigazionnaja Sputnikowaja Sistema (russ.)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
GPST	GPS Time
GRS80	Geodetic Reference System 1980
GSM	Global System for Mobile Communications
GSM-R	GSM-Railway
IGS	International GNSS Service
INS	Inertial Navigation System
ITRF2014	International Terrestrial Reference Frame 2014
ITRS	International Terrestrial Reference System
MAC	Master Auxiliary Concept
MCS	Master Control Station
MSAS	Multi Functional Satellite Augmentation System
NMEA	National Marine Electronics Association
OEM	Original Equipment Manufacturer

PPP	Precise Point Positioning
PRN	Pseudo Random Noise
QZSS	Quasi Zenith Satellite System
RBMC	Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo
RINEX	Receiver Independent Exchange Format
RTCM	Radio Technical Commission for Maritime Services
RTK	Real Time Kinematic
RTPPP	Real Time PPP
RTS	Real Time Service
RTX	Real Time Extended
SBAS	Satellite Based Augmentation Systems
SC-104	Special Committee No. 104
SP3	Standard Product # 3
SPP	Single Point Positioning
TAI	Temps Atomique International
UERE	User Equivalent Range Error
UHF	Ultra High Frequency
UT	Universal Time
UTC	Universal Time Coordinated
UTM	Universal Transverse Mercator
VHF	Very High Frequency
VRS	Virtuelle Referenzstation
WAAS	Wide Area Augmentation System
WGS 84	World Geodetic System 1984

# Abbildungsverzeichnis

1.1	Pferdebahn Budweis–Linz–Gmunden . . . . .	1
1.2	Trevithicks Dampflokomotive . . . . .	2
1.3	Locomotion No.1 & Eröffnung der 1. Eisenbahnstrecke . . . . .	3
1.4	Dampflokomotive: Pennsylvania Railroad Class K-4s . . . . .	3
1.5	Dichte des globalen Schienennetzes . . . . .	5
2.1	Scherfestigkeit . . . . .	10
2.2	Skelettkorn, Distanzkorn und Füllkorn . . . . .	10
2.3	Bettungsreinigungsmaschine RM 80 UHR . . . . .	13
2.4	Aushubkette . . . . .	14
2.5	Kettenverschleisskurve und Förderleistung . . . . .	15
2.6	idealisiertes Prinzip der GNSS-Positionierung . . . . .	19
2.7	Auswirkung der Fehler auf das Prinzip der GNSS-Positionierung . . . . .	19
2.8	Veranschaulichung von kartesischen und ellipsoidischen Koordinaten . . . . .	23
2.9	Keplerelemente . . . . .	25
2.10	GPS Raumsegment . . . . .	28
2.11	GPS Kontrollsegment . . . . .	29
2.12	GNSS-Signalstruktur . . . . .	32
2.13	Signalausbreitung . . . . .	33
2.14	Dilution of Precision . . . . .	39
3.1	DGNSS Prinzip . . . . .	42
3.2	Prinzip der Phasenmessung . . . . .	44
3.3	Referenznetz: APOS . . . . .	46
3.4	Konzept der virtuellen Referenzstation . . . . .	46
3.5	Master-Auxilliary-Konzept . . . . .	47
3.6	Referenznetz: RBMC-IP . . . . .	48
3.7	Methodik: CenterPoint RTX . . . . .	52
3.8	Abdeckung: CenterPoint RTX & RTX-Fast . . . . .	52
4.1	Reichweite: Frequenz-/Höhenabhängigkeit; ländliche Umgebung . . . . .	62
4.2	Reichweite: Frequenz-/Höhenabhängigkeit; urbane Umgebung . . . . .	62
4.3	Reichweitenunterschied hinsichtlich Empfängerempfindlichkeit . . . . .	63
4.4	Mobilnetzversorgung Österreich . . . . .	65

4.5	GSM-R Ausbauplan . . . . .	65
4.6	Anzahl operationeller GNSS-Satelliten . . . . .	68
4.7	sichtbare GNSS-Satelliten am 24. Juli 2019, Nähe Angern . . . . .	69
4.8	DOP-Parameter am 24. Juli 2019, Nähe Angern . . . . .	69
4.9	Sat. Verfügbarkeit: 15. März 2018, Testfahrt Amstetten/St.Valentin . . . . .	71
4.10	DOP-Parameter: 15. März 2018, Testfahrt . . . . .	71
4.11	DOP-Parameter: 15. März 2018, Testfahrt (verminderte Sat. Anzahl) . . . . .	72
5.1	Messtriebwagen EM100VT . . . . .	76
5.2	GNSS Empfänger: JAVAD SIGMA . . . . .	77
5.3	OEM-Empfänger: Quattro-G3D . . . . .	78
5.4	Antenne: JAVAD GrAnt G3T . . . . .	78
5.5	Antennenanordnung am EM100VT . . . . .	79
5.6	Laserprofilsensor: Gocator 2350 . . . . .	79
5.7	Messgebiet Abschnitt Angern/Dürnkrot . . . . .	80
5.8	Koordinatensystem der Gocator-Messung (Objektsystem) . . . . .	80
5.9	Diskontinuierliche Messung infolge von Abschattungen . . . . .	82
5.10	Überführung der Gleisachse in das ITRF . . . . .	84
5.11	Ablauf für Erhalt von vergleichbaren GNSS-Positionen . . . . .	85
5.12	Berechnungsverfahren der 2D-Lage-Abweichungen . . . . .	86
5.13	Ablauf zur Beurteilung der Transformationsgenauigkeit . . . . .	88
5.14	System ZusiVT . . . . .	89
5.15	Referenztrajektorie, Dach TU Wien . . . . .	91
5.16	Lageabweichung Nordbahn; Daten ungefiltert . . . . .	94
5.17	Scheinbare Abweichung zur Referenz (Google Earth) . . . . .	95
5.18	Lageabweichung Nordbahn; Daten gefiltert . . . . .	96
5.19	Höhenabweichung Nordbahn; Daten ungefiltert . . . . .	97
5.20	Höhenabweichung Nordbahn; Daten gefiltert . . . . .	97
5.21	Abweichung der Antennen-Streckendifferenzen . . . . .	98
5.22	Probleme der Antennenengeometrie bei Abschattung . . . . .	99
5.23	Positionssprünge der Antenne anhand von Abschattungen . . . . .	99
5.24	Abweichung der Streckendifferenzen ohne Sprünge/Ausreißer . . . . .	100
5.25	Genauigkeit der Translationsparameter . . . . .	100
5.26	Genauigkeit der Rotationsparameter . . . . .	101
5.27	Abweichung der transformierten Koordinaten (ITRF) . . . . .	102
5.28	Abweichung der transformierten Koordinaten (UTM) . . . . .	102
5.29	Koordinatendifferenzen, statisch, Netz-RTK . . . . .	103
5.30	Koordinatendifferenzen, statisch, Basis/Rover-RTK . . . . .	104
5.31	Kinematische Lageabweichung, Dach TU Wien . . . . .	105
5.32	Kinematische Höhenabweichung, Dach TU Wien . . . . .	106

# Tabellenverzeichnis

1.1	Globale Verteilung der Schienenlänge . . . . .	4
1.2	Auszug: Schienen Control Jahresbericht 2018 . . . . .	5
2.1	Verzahnungsanteil und innerer Reibungswinkel . . . . .	11
2.2	Datenblattauszug: RMW 1500 . . . . .	15
2.3	Keplerelemente . . . . .	25
2.4	Repräsentative UERE-Werte . . . . .	38
3.1	Fehlerniveau der SPP Lösung und der DGNSS Lösung . . . . .	42
3.2	IGS Produkte . . . . .	50
3.3	Internationale Positionierungsdienste . . . . .	54
3.4	Eigenschaften präziser GNSS-Methoden . . . . .	55
4.1	Vorteile einer lokalen Referenzstation . . . . .	59
4.2	mittlere DOP-Parameter; Testfahrt Amstetten/St.Valentin . . . . .	72
5.1	Empfangbare Frequenzbänder der G3T Antenne . . . . .	78
5.2	Eckdaten: Gocator 2350 . . . . .	79
5.3	Auszug: Messdaten Gocator-Messung . . . . .	81
5.4	Auszug: Messdaten GNSS-Messung . . . . .	81
5.5	Ergebnisse der Kalibrierung . . . . .	83
5.6	Koordinaten der ZusiVT-Referenztrajektorie . . . . .	91
5.7	Lage-Genauigkeiten: Netz-RTK; kinematisch (EM100VT) . . . . .	96
5.8	Höhen-Genauigkeiten: Netz-RTK; kinematisch (EM100VT) . . . . .	98
5.9	Genauigkeiten der Transformationsparameter . . . . .	101
5.10	Genauigkeiten der transformierten Koordinaten . . . . .	102
5.11	Koordinaten-Genauigkeiten: Netz-RTK; statisch (ZusiVT) . . . . .	103
5.12	Koordinaten-Genauigkeiten: Basis/Rover-RTK; statisch (ZusiVT) . . . . .	104
5.13	Genauigkeiten: Netz-RTK vs. Basis/Rover-RTK; statisch (ZusiVT) . . . . .	105
5.14	Lage-Genauigkeiten: Netz-RTK; kinematisch (ZusiVT) . . . . .	105
5.15	Lage-Genauigkeiten: Basis/Rover-RTK; kinematisch (ZusiVT) . . . . .	106
5.16	Höhen-Genauigkeiten: Netz-RTK; kinematisch (ZusiVT) . . . . .	107
5.17	Höhe-Genauigkeiten: Basis/Rover-RTK; kinematisch (ZusiVT) . . . . .	107

# Literaturverzeichnis

- Bauer, M. (2018). *Vermessung und Ortung mit Satelliten: Globales Navigationssatellitensystem (GNSS) und andere satellitengestützte Navigationssysteme*. Berlin: Wichmann.
- BEV (2018). Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. Persönliche Mitteilung vom 26. November 2018.
- BEV (2019). Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen. <http://www.bev.gv.at>. [Online; Stand: 02. April 2019].
- BGBI. (2008). Bundesgesetzblatt Republik Österreich. Teil II 398. Verordnung. Eisenbahnbau- und -betriebsverordnung - EisbBBV sowie Änderung der Eisenbahnverordnung 2003 - EisbVO 2003.
- BMVIT (2019a). Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. <https://www.bmvit.gv.at>. [Online; Stand: 26. März 2019].
- BMVIT (2019b). Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie. Persönliche Mitteilung vom 20. September 2019.
- EPOSA (2018). Echtzeit Positionierung Austria. <http://www.eposa.at>. [Online; Stand: 21. November 2018].
- EUREF (2018). Reference Frame Sub-Commission for Europe. <http://www.euref.eu>. [Online; Stand: 26. November 2018].
- Fugro (2019). <https://www.fugro.com>. [Online; Stand: 15. April 2019].
- GPS.gov (2019). Official U.S. government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics. <https://www.gps.gov>. [Online; Stand: 25. Juli 2019].
- Grace's Guide (2019). <https://www.gracesguide.co.uk>. [Online; Stand: 25. Juni 2019].
- GSMA (2019a). GSM Association. <https://www.gsma.com>. [Online; Stand: 28. März 2019].

- GSMA (2019b). GSM Association. <http://maps.mobileworldlive.com>. [Online; Stand: 28. März 2019].
- Hauke, R. & Auer, F. (Mai 2016). *Der Eisenbahningenieur - Internationale Fachzeitschrift für Schienenverkehr & Technik*, (Gleisbaumaschinen und -geräte).
- IBGE (2018). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. <https://ww2.ibge.gov.br>. [Online; Stand: 4. Dezember 2018].
- IERS (2018). International Earth Rotation and Reference Systems Service. [https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home\\_node.html](https://www.iers.org/IERS/EN/Home/home_node.html). [Online; Stand: 26. November 2018].
- IGS (2018). International GNSS Service. <http://www.igs.org>. [Online; Stand: 26. November 2018].
- JAVAD (2019). JAVAD GNSS. <https://www.javad.com/jgnss>. [Online; Stand: 19. September 2019].
- Kahmen, H. (2006). *Angewandte Geodäsie: Vermessungskunde*. De Gruyter Lehrbuch. Berlin: Walter de Gruyter.
- Kaplan, E. & Hegarty, C. (2017). *Understanding GPS/GNSS - Principles and Applications*. United States of America: Artech House.
- Klotzinger, E. (Jänner, Februar 2008). *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, (Der Oberbauschotter - Teil 1: Anforderungen und Beanspruchung).
- Klotzinger, E. (März 2007). *ETR - Eisenbahntechnische Rundschau*, (Der Oberbauschotter - Teil 2: Qualitätsverlauf und Eingriffsschwellen).
- Lichtberger, B. (2010). *Handbuch Gleis: Unterbau, Oberbau, Instandhaltung, Wirtschaftlichkeit*. Hamburg: Eurailpress.
- LMI (2019). LMI Technologies Inc. Datenblatt 3.0 Gocator 2300 Serie.
- Misar, H. (August 2004). *Der Eisenbahningenieur - Internationale Fachzeitschrift für Schienenverkehr & Technik*, (Bettungsreinigung).
- Molisch, A. F. (2011). *Wireless Communications*. Chichester, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
- National Museum Wales (2019). <https://museum.wales>. [Online; Stand: 25. Juni 2019].

- Navipedia (2018). <https://gssc.esa.int/navipedia>. [Online; Stand: 25. Oktober 2018].
- NMEA (2018). National Marine Electronics Association. <https://www.nmea.org>. [Online; Stand: 29. November 2018].
- ÖBB (2019). Österreichische Bundesbahn. <https://infrastruktur.oebb.at>. [Online; Stand: 27. März 2019].
- OmniSTAR (2019). <http://www.omnistar.com>. [Online; Stand: 15. April 2019].
- OpenRailwayMap (2019). <https://www.openrailwaymap.org>. [Online; Stand: 15. Oktober 2019].
- Plasser & Theurer (2019). <https://www.plassertheurer.com>. [Online; Stand: 25. Juni 2019].
- Prenesti, E. & Gosmaro, F. (2015). *Accreditation and Quality Assurance*, (Trueness, precision and accuracy: a critical overview of the concepts as well as proposals for revision).
- Rail Archive (2019). <https://www.railarchive.net>. [Online; Stand: 25. Juni 2019].
- RTCM (2018). Radio Technical Commission for Maritime Services. <http://www.rtcn.org/home.html>. [Online; Stand: 29. November 2018].
- RTKLIB (2019). *Manual RTKLIB ver.2.4.3 b31*.
- Schienen Control (2019). <https://www.schienencontrol.gv.at/de>. [Online; Stand: 25. Juni 2019].
- SIGMA (2009). JAVAD GNSS, Inc. - SIGMA GNSS Receiver Operator's Manual Version 1.1.
- Spectra Geospatial (2016). SP80 User Guide.
- Teunissen, P. & Montenbruck, O. (2017). *Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems*. Schweiz: Springer International Publishing.
- Teunissen, P. & Odijk, D. (1997). *Proceedings of the 10th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation*, .
- Trimble GNSS Planning Online (2019). <https://www.gnssplanning.com>. [Online; Stand: 02. April 2019].

Trimble Positioning Service (2019). <https://positioningservices.trimble.com>. [Online; Stand: 15. April 2019].

Tzanakakis, K. (2013). *The Railway Track and Its Long Term Behaviour*. Hamburg: Springer-Verlag.

UIC (2019). International union of railways. <https://uic.org>. [Online; Stand: 25. Juni 2019].

Wiebe (2018). Wiebe Holding GmbH & Co. KG. <https://www.wiebe.de/en/rmw-1500>. [Online; Stand: 17. Oktober 2018].

Zhanga, L., Yangb, H., Gaob, Y., Yaoa, Y., & Xua, C. (Juni 2018). *Advances in Space Research*, (Evaluation and analysis of real-time precise orbits and clocks products from different IGS analysis centers).